



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Rita Roma Torres Leite de Castro

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

Novembro de 2012



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Rita Roma Torres Leite de Castro

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

Tese de Mestrado

Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efectuado sob a orientação do

Professor Doutor Luís Bragança

Novembro de 2012

DECLARAÇÃO

Nome: Rita Roma Torres Leite de Castro

Endereço Electrónico: rita.roma.castro@gmail.com

Contacto telefónico: 919320244

Número de Cartão de Cidadão: 12225988

Título da Dissertação: Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

Subtítulo da Dissertação: Estudo de processos de apoio ao projeto de edificação na escolha do tipo e material da estrutura, com base na Construção Sustentável.

Data de Conclusão: Novembro 2012

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Bragança de Miranda e Lopes

Integrado em: Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis

Departamento de Engenharia Civil

Escola de Engenharia

Universidade do Minho

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, __/__/____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido possível sem a partilha de conhecimentos por parte do meu orientador, Professor Doutor Luís Bragança, a quem agradeço a colaboração, o apoio, a disponibilidade e a crítica ao longo deste trabalho.

Agradeço à Marta pela disponibilidade e atenção com que partilhou informação essencial para o desenvolvimento do trabalho. Agradeço também ao João pela execução do projeto da estrutura metálica.

Agradeço aos professores e colegas do Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis por impulsionarem o interesse neste tema e proporcionarem uma interessante troca de conhecimentos.

Por fim, agradeço aos meus pais, por tornarem tudo isto possível. À Mariana e ao André pela presença e apoio. Ao Francisco agradeço os momentos de distração e alegria. E ao Tiago agradeço a compreensão e a companhia.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi a análise do desempenho do sistema estrutural, no contexto da construção sustentável. Em primeiro lugar, foi apresentado o estado da arte deste tema, através da contextualização das metodologias existentes bem como de alguns estudos semelhantes já realizados. Como caso de estudo, foram comparadas duas estruturas representativas dos dois materiais estruturais, o betão e o aço, com desenhos distintos mas com a mesma função estrutural. Através da análise LCA de cada estrutura, bem como do respectivo desempenho económico e social, o balanço sustentável foi feito entre as três dimensões. Neste contexto, a estrutura em betão apresentou-se com melhor desempenho sustentável, sendo também a estrutura com melhor desempenho individual na área económica. No que diz respeito ao comportamento ambiental, a estrutura em aço apresentou o melhor desempenho. Quanto à dimensão social, as duas estruturas apresentaram resultados semelhantes.

Por fim, foi feita a comparação destes resultados com os estudos apresentados, relacionando as suas características principais com o presente trabalho. Esta análise permitiu concluir que a eleição do material mais sustentável entre o betão e o aço não é consensual.

ABSTRACT

The main objective of this study was to analyze the performance of the structural system in the context of sustainable construction. Firstly, there was presented the state of the art in this issue, through contextualization of existing methodologies as well as some similar studies already performed. As a case study, we compared two representative structures of the two structural materials: concrete and steel, but with distinctive designs with the same structural function. Through LCA analysis of each structure, as well as its economic and social performance, the balance was done through the results on the three dimensions. In this context, the concrete structure was presented with the best sustainability performance, and also the structure with the best individual performance in the economic area. With regard to environmental performance, the steel structure presented the best performance. Regarding the social dimension, the two structures showed similar results.

Finally, a comparison was made with the results of the studies presented, relating the main characteristics of the present work. This analysis concluded that the election of the more sustainable material, between the concrete and steel, is not consensual.

ÍNDICE

Lista de quadros, figuras, gráficos e abreviações

1. APRESENTAÇÃO.....	9
1.1. Introdução	9
1.2. Objetivos	11
1.3. Metodologia e Organização da Dissertação	12
2. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL.....	17
2.1. Construção sustentável.....	17
2.2. Análise do ciclo de vida.....	21
2.2.1. Âmbito, objetivo e etapas LCA	21
2.2.2. Inventário do ciclo de vida	23
2.2.3. Regulamentação LCA	24
2.3. Declaração ambiental de produto	33
2.4. Análise do custo do ciclo de vida	34
2.5. Avaliação e certificação sustentável	35
2.6. Principais características dos materiais	38
2.6.1. Betão	39
2.6.2. Aço	43
2.7. Apresentação de estudos de comparação sustentável entre materiais.....	45
3. CASO DE ESTUDO: COMPARAÇÃO ENTRE DUAS SOLUÇÕES ESTRUTURAIS	59
3.1. Importância da Estrutura	59
3.2. Objetivos	61
3.3. Metodologia.....	62
3.3.1. Unidade funcional	62
3.3.2. Medição de quantidades	63
3.3.3. Limites do estudo	65
3.4. Classificação e caracterização dos indicadores sustentáveis	66
3.4.1. Indicadores ambientais.....	67
3.4.1.1. Consumo de energia	68
3.4.1.2. Emissões atmosféricas.....	69
3.4.1.3. Esgotamento de recursos naturais	71
3.4.2. Indicadores económicos	71
3.4.2.1. Custo de construção.....	72
3.4.3. Considerações sociais.....	72

3.5. Normalização e agregação	73
3.5.1. Desempenho ambiental.....	74
3.5.2. Desempenho económico.....	75
3.5.3. Desempenho sustentável	77
3.6. Estrutura A	77
3.6.1. Descrição da estrutura	77
3.6.2. Análise da estrutura.....	79
3.7. Estrutura B	80
3.7.1. Descrição da estrutura	80
3.7.2. Análise da estrutura.....	82
3.8. Comparação entre as estruturas.....	83
3.8.1. Quantidade de material	83
3.8.2. Desempenho ambiental.....	85
3.8.3. Desempenho económico.....	91
3.8.4. Desempenho social	96
3.9. Interpretação de resultados	102
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	107
4.1. Análise dos resultados dos estudos semelhantes	107
4.2. Sustentabilidade das estruturas de betão e de aço	114
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
5.1. Conclusão	119
5.2. Perspectivas de desenvolvimento do trabalho futuro	120
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
7. ANEXOS.....	129

LISTA DE QUADROS

Quadro I - Categorias e parâmetros considerados no desempenho ambiental de cada estrutura.....	68
Quadro II - Quantidade de material calculado para a estrutura A	79
Quadro III - Quantidade de material calculado para a estrutura B.	82
Quadro IV - Comparação da quantidade de material entre a estrutura A e a estrutura B.....	84
Quadro V - Comparação dos impactos ambientais no consumo de energia das duas estruturas.....	85
Quadro VI - Comparação dos impactos ambientais na categoria de emissões atmosféricas das duas estruturas.	86
Quadro VII - Comparação dos impactos ambientais na categoria de esgotamento de recursos das duas estruturas.	87
Quadro VIII - Normalização e agregação dos impactos ambientais da estrutura A.	88
Quadro IX - Normalização e agregação dos impactos ambientais da estrutura B.	88
Quadro X - Desempenho ambiental das estruturas. (Cenário 1)	89
Quadro XI - Desempenho ambiental das duas estruturas. (Cenário 2).....	90
Quadro XII - Desempenho ambiental das duas estruturas (Cenário 3).....	90
Quadro XIII - Custo de construção das duas estruturas.....	92
Quadro XIV - Custo de material, equipamento e mão-de-obra das duas estruturas.....	93
Quadro XV - Definição dos valores de melhor prática e prática convencional nos vários cenários (www.ine.pt).	95
Quadro XVI - Desempenho económico das duas estruturas em 3 cenários, consoante a percentagem de custo da estrutura no custo total da obra	95
Quadro XVII - Desempenho social das duas estruturas.....	100
Quadro XVIII - Desempenho sustentável qualitativo, tendo em consideração as três dimensões estudadas.....	102
Quadro XIX - Desempenho sustentável das duas estruturas, nos cenários 1, 2 e 3.	103
Quadro XX - Desempenho sustentável das duas estruturas, nos cenários 4, 5 e 6.	105
Quadro XXI – Resultado final do desempenho sustentável da estrutura A e estrutura B ...	106
Quadro XXII - Síntese das principais informações dos estudos analisados.	108

LISTA DE FIGURAS

Figure 1 - Esquema das etapas da avaliação sustentável (Ochsendorf, Norford, Brown, Durschlag, Hsu, Love, Santero, Swei, Webb e Wildnauer, 2011).	22
Figure 2 - Programa de trabalho proposto pela Norma Europeia (CENT/TC 350, 2011).	25
Figure 3 - Esquema dos módulos para as diferentes fases do ciclo de vida da avaliação sustentável (CENT/TC 350, 2011).....	24
Figure 4 - Diagrama do âmbito do estudo consoante as fases de ciclo de vida consideradas para a avaliação sustentável (Khasreen, Banfill e Menzies, 2009).	25
Figure 5 - Esquema de colaboração entre os sistemas LCA e CAD (Morbidoni, Favi, Mandorli e Germani, 2012).	32
Figure 6 - Esquema do processo de EPD (Andersen, 2012)	33
Figure 7 - Equação da análise LCCA (Rist, 2011).....	34
Figure 8 - Esquema da operação de reutilização do edifício Condor Tower, em Perth, através do aumento da estrutura. Fotografia do resultado final.	41
Figure 9 - Diagrama dos processos de produção da estrutura de betão (Johnson, 2006) ...	42
Figure 10 - Diagrama dos processos de produção da estrutura em aço (Johnson, 2006)....	45
Figure 11 - Quadro dos resultados da comparação entre a estrutura de betão e de aço (Kerman, 2001).	46
Figure 12 - Gráficos dos resultados da comparação entre a estrutura de aço e de betão nos vários indicadores considerados. (Buckley, Halsall, Vollering e Webber, 2002)	47
Figure 13 - Quadro do desempenho ambiental das vigas de betão armado e de aço (Godfrey e Struble, 2004).	48
Figure 14 - Representação gráfica dos resultados obtidos entre a comparação dos elementos estruturais de betão e de aço (Peyroteo, Carvalho e Jalali, 2005).	49
Figure 15 - Representação gráfica do desempenho ambiental das quadros vigas em estudo (Gervásio, 2006).	50
Figure 16 - Representação gráfica do desempenho ambiental (esquerda) e económico (direita) da estrutura em betão e em aço (Gervásio, 2006).	51
Figure 17 - Representação gráfica do desempenho global da estrutura de betão e de aço (Gervásio, 2006).	51
Figure 18 - Quadro dos resultados do desempenho ambiental da estrutura de aço e de betão (Johnson, 2006).	52
Figure 19 - Representação gráfica do desempenho da estrutura em betão armado, em aço e em madeira em cada indicador ambiental. (Passer, Cresnik, Schulter e Maydl, 2007)	53

Figure 20 - Representação gráfica do desempenho ambiental da estrutura em betão e em aço. (Zhang, Su e Huang, 2007).	54
Figure 21 - Representação gráfica do desempenho ambiental da estrutura em betão e em aço. (Weisenberer, 2010)	55
Figure 22 - Representação gráfica do desempenho ambiental no indicador de utilização de energia não renovável na estrutura em aço e em betão (Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012).....	56
Figure 23 - Representação gráfica do desempenho ambiental no indicador de utilização de energia não renovável na estrutura em aço e em betão(Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012).....	56
Figure 24 - Representação gráfica da energia incorporada inicial distribuída pelos vários processos construtivos (fonte: http://www.canadianarchitect.com)	59
Figure 25 - Diagrama do consumo de energia de um edifício de escritórios numa expectativa de vida de 60 anos (fonte: http://www.corusconstruction.com)	60
Figure 26 – Consumo de energia ao longo do tempo de vida de 50 anos (Kendall, 2010)...	61
Figure 27 - Equação de Edifícios de Carbono Zero (fonte: http://www.carbono-zero.com) ..	69
Figure 28 - Esquema da estrutura A.....	78
Figure 29 - Esquema da estrutura B.....	81
Figure 30 - Propriedades térmicas dos materiais de construção (Cement & Concrete Institute, 2011).	97
Figure 31 - Esquema do processo de reciclagem do aço (Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012).....	98
Figure 32 - Produção de desperdícios da utilização dos materiais de construção (fonte: http://www.corusconstruction.com)	99
Figure 33 – Comparação entre o consumo de energia e dos impactos da produção de aço em alto forno e a produção em forno de arco eléctrico (Gervásio, 2006).	116
Figure 34 - Alteração do custo de produção do aço ao longo do tempo (fonte: http://www.corusconstruction.com)	116
Figure 35 - Protótipo de sistema estrutural sustentável: AÇO + BETÃO + MADEIRA. (Busby Associates Architects).	117
Figure 36 - Formas de minimizar os impactos globais, além da escolha dos materiais (Andersen, 2012).	120

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentagem dos materiais utilizados na estrutura A.....	79
Gráfico 2 - Percentagem de quantidade de material utilizado por cada tipo de elemento no conjunto da estrutura A.....	79
Gráfico 3 - Percentagem de utilização de cada material por elementos estrutural (estrutura A).	80
Gráfico 4 - Percentagem dos materiais utilizados na estrutura B.....	82
Gráfico 5 - Percentagem de quantidade de material utilizado por cada tipo de elemento no conjunto da estrutura B.....	82
Gráfico 6 - Percentagem de utilização de cada material por elementos estrutural (estrutura B).	83
Gráfico 7 - Comparação da quantidade de material utilizado nas duas estruturas.	84
Gráfico 8 – Representação do desempenho das duas estruturas na categoria de consumo de energia.....	85
Gráfico 9 - Representação do desempenho das duas estruturas na categoria de emissões atmosféricas.	86
Gráfico 10 - Representação do desempenho das duas estruturas na categoria de esgotamento de recursos.	87
Gráfico 11 - Pontuação dos parâmetros da estrutura A	Gráfico 12 - Pontuação dos parâmetros da estrutura B
88	88
Gráfico 13 - Desempenho das categorias ambientais das duas estruturas. (Cenário 1)	89
Gráfico 14 - Desempenho das categorias ambientais das duas estruturas. (Cenário 2)	91
Gráfico 15 - Desempenho das categorias ambientais das duas estruturas. (Cenário 3)	91
Gráfico 16 - Custo por m ² das operações associadas aos materiais utilizados nas duas estruturas.....	92
Gráfico 17 - Custo de material, equipamento e mão-de-obra por m ² nas duas estruturas. ...	93
Gráfico 18 - Desempenho económico das duas estruturas nos três cenários considerados.	95
Gráfico 19 - Desempenho sustentável das duas estruturas, no cenário 1, 2 e 3.	104
Gráfico 20 - Desempenho sustentável das duas estruturas, nos cenários 4, 5 e 6.	105
Gráfico 21 - Desempenho ambiental e económico das duas estruturas.	106
Gráfico 22 - Desempenho sustentável duas estruturas.....	106

LISTA DE ABREVIações

AP – Potencial de Acidificação

BIM – Building Information Models (Modelos de Informação dos Edifícios)

CAD – Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)

CEN – Comissão Europeia de Normalização

EP – Potencial de Eutrofização

ENR – Energia não Renovável Incorporada

EPD – Environmental Product Declaration (Declaração Ambiental de Produto)

ER – Energia Renovável Incorporada

GWP – Potencial de Aquecimento Global

iiSBE – International Initiative of the Sustainable Built Environment

ISO – Organização Internacional de Normalização

LCA – Life-Cycle Assessment (Análise de Ciclo de Vida)

LCCA – Life-Cycle Costs Assessment (Análise de Custos de Ciclo de Vida)

LCI – Life-Cycle Inventory (Inventário de Ciclo de Vida)

LCIA – Life-Cycle Inventory Assessment (Análise de Inventário de Ciclo de Vida)

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ODP – Potencial de Destruição da Camada de Ozono

PCR – Products Category Rules (Regras de Categoria de Produtos)

PFMI – Post-Frame Marketing Initiative

POCP – Potencial de Formação do Ozono Troposférico

1. APRESENTAÇÃO

1.1. Introdução

A definição de **Desenvolvimento Sustentável** surge pela primeira vez em 1987, como “aquele que permite satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas” (Jalali e Torgal, 2010). Mais tarde, em 1994, surge o conceito de **Construção Sustentável** associado à “criação e manutenção responsáveis de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e no projeto baseado em princípios ecológicos” (Jalali e Torgal, 2010).

O conceito de construção sustentável pode ser definido por três dimensões: ambiental, económica e social, como pilares da sustentabilidade. No que diz respeito à dimensão ambiental, os principais objetivos prendem-se com a proteção de recursos, do ecossistema e do bem-estar humano. Na perspectiva económica, a construção sustentável procura minimizar os custos relativos ao ciclo de vida do edifício, desde a extração, produção, construção, utilização e fim de vida. Por fim, a dimensão social prende-se com aspetos que influenciam a saúde, segurança e conforto dos utilizadores do edifício.

Tendo em conta os princípios gerais da sustentabilidade, é possível atribuir ao sector da construção uma quota importante de responsabilidade pelos impactos ambientais que atingem o nosso território, pela utilização de grandes quantidades de energia e produção de emissões atmosféricas. Também no que diz respeito aos impactos sociais e económicos, a construção apresenta-se como grande motor da economia da sociedade e como principal responsável pelo ambiente construído. O desafio da sustentabilidade é perceber como é possível alimentar as aspirações da sociedade sem comprometer o seu futuro. Apesar das difíceis condições económicas que a sociedade atual enfrenta, a necessidade de construir mais edifícios e melhorar o património existente continua a ser permanente, ainda que seja agora acompanhada de novos condicionalismos a par de novas tecnologias.

Atualmente, à sustentabilidade associa-se a “Construção Verde”, que se transformou num dos argumentos mais relevantes na promoção da nova construção. Baseada na criação de edifícios sustentáveis, são promovidos principalmente os materiais verdes ou reciclados e os sistemas de captação e utilização de energia solar. No entanto, nenhum destes aspectos garante por si só a construção sustentável. Ainda assim, a eficiência energética é sem dúvida um factor crucial para atingir um melhor desempenho ambiental de um edifício, principalmente quando temos em consideração que a fase de utilização dos

edifícios é a etapa de vida que mais contribui para o consumo total de energia. Segundo estudos realizados, esta fase do ciclo de vida pode representar entre 80% a 94% do consumo total, sendo que desta forma, a extração e produção dos materiais representa entre 6% a 20% (Bragança e Mateus, 2011). Por esta razão, a eficiência energética tornou-se uma prioridade na procura da construção sustentável e tem já um papel importante no mercado atual, tendo também lugar na legislação aplicável aos edifícios. No entanto, este avanço para um melhor desempenho energético ao longo da fase de utilização de um edifício vem também contribuir para um aumento de relevância da fase de produção dos materiais e produtos.

De maneira a acompanhar a evolução do pensamento sustentável na sociedade, mais precisamente no sector da construção, têm surgido no mercado ferramentas que permitem avaliar o comportamento sustentável de um material, produto, sistema ou edifício, nas várias etapas da vida, com especial relevância para o desempenho ambiental do objeto de estudo. Assim, os sistemas de avaliação e certificação sustentável existentes são atualmente o método mais seguro na tradução de conceitos sustentáveis em edifícios realmente “verdes”. Estes sistemas permitem analisar, em diferentes etapas do ciclo de vida dos edifícios, a aplicação das regras de “boas práticas” nas diferentes categorias consideradas. O equilíbrio entre vários indicadores é o factor comum entre todas as metodologias, sendo que é a seleção destes e o caminho para atingir o mesmo objetivo que distingue cada uma delas.

Neste contexto, é essencial estabelecer prioridades e com isso definir regras e limites impostos por legislação adequada a cada realidade. A avaliação obrigatória da sustentabilidade será um passo fulcral no processo da edificação nova (bem como da reabilitação), de maneira a estabelecer condições de concorrência para os que cumprem os pressupostos sustentáveis, que estão já integrados na mentalidade de uma grande parte dos intervenientes nestes processos. Atualmente existem várias ferramentas que permitem fazer a avaliação da sustentabilidade, associadas a diferentes escalas de avaliação, como a análise de ciclo de vida dos materiais, os processos construtivos ou o edifício no seu conjunto. Estas ferramentas, que normalmente são importadas de outros países, têm que ser adaptadas à realidade de atuação, de maneira a tornar os seus resultados mais fiáveis. Apesar da importância que assumem, estas metodologias são sempre sistemas simplificados, e de alguma maneira redutores, pois é impossível abranger todas as situações.

Como ferramenta de gestão ambiental, a Análise do Ciclo de Vida (LCA) transformou-se, nos últimos anos, numa metodologia de análise internacionalmente

reconhecido de avaliação do desempenho de material, produto ou edifício. Assim, a utilização adequada de produtos e tecnologias é um forte contributo para um melhor desempenho ambiental, principalmente quando são avaliados em todo o seu ciclo de vida e na sua influência no comportamento geral do edifício (Bragança e Mateus, 2011).

A maior parte dos sistemas de avaliação sustentável não dá atenção específica ao sistema estrutural, o que consequentemente desvaloriza o uso de sistemas inovadores. Este factor pode implicar um maior atraso na evolução dos sistemas estruturais no caminho da construção sustentável, pois as consequências não têm reflexos diretos na avaliação global. No entanto, a escolha dos materiais utilizados tem influência no resultado de cada estudo, ainda que normalmente envolvidos no conjunto geral dos materiais utilizados. Por esta razão, não se pode dizer que os sistemas estruturais sejam negligenciados na análise global de um edifício, apenas não lhes é atribuída uma importância específica.

A Post-Frame Marketing Initiative (PFMI) reconhece que o sistema estrutural é em si um processo eficiente na procura da construção verde e promove a investigação sobre aspectos sustentáveis da estrutura. Um dos seus estudos conclui que os métodos estruturais mais correntes apresentam já muitos aspectos sustentáveis, ainda que não se tenha plena consciência disso (Hindman, 2011).

Entre a estrutura de aço e a de betão, é difícil assumir qual o sistema que é quantitativamente mais sustentável. Sem qualquer análise rigorosa, uma boa parte dos intervenientes da construção, e mesmo as pessoas mais distantes desta área, indicariam o aço como o material mais sustentável, pois apresenta vantagens reconhecíveis, como a possibilidade de reciclagem, a redução de resíduos e a menor destruição de recursos. No entanto, estas análises são feitas empiricamente, e por isso o seu valor não é definitivo. Desta forma, é interessante analisar cada um dos sistemas estruturais, de maneira a compreender o respectivo desempenho e, dessa forma, poder eleger o material estrutural mais sustentável.

1.2. Objetivos

Os materiais utilizados numa obra têm uma grande influência no comportamento geral do edifício e, por isso, adquirem uma importância relevante no respectivo desempenho sustentável. O sistema estrutural eleito para erguer o edifício pode assim também ser sujeito a uma análise sustentável, de maneira a optar pela melhor solução numa fase de projeto, onde boa parte das decisões estão ainda em aberto. A aplicação de

metodologias de Análise do Ciclo de Vida e Avaliação de Sustentabilidade às estruturas utilizadas na construção permite avaliar os impactes ambientais, económicos e sociais da produção dos materiais estruturais bem como da sua utilização e demolição, podendo influenciar a escolha do sistema estrutural para erguer o edifício. A intervenção deste tipo de análise numa fase de projeto terá consequências inevitáveis no desenho dos edifícios, o que de futuro poderá ditar novas tendências ou correntes arquitectónicas. No passado, pudemos assistir à influência direta da evolução dos materiais e sistemas construtivos na imagem dos edifícios que lhes foram consequentes, sendo por isso possível adivinhar que também as inovações tecnológicas mais recentes, associadas ao desenvolvimento da construção sustentável, terão consequências visíveis na imagem da futura arquitetura (Castro, 2008).

A introdução dos conceitos de construção sustentável na fase inicial do projeto estrutural pode influenciar o comportamento global do edifício ao longo do seu ciclo de vida. Assim, abrir caminho para um potencial método de apoio ao projeto para prever qual a melhor solução estrutural dentro dos pressupostos sustentáveis torna-se o principal objetivo deste estudo.

De maneira a encontrar condições para atingir o objetivo pretendido, este trabalho promove uma investigação sobre a sustentabilidade dos sistemas estruturais, através a comparação entre duas estruturas distintas. Este método permite não só procurar os indicadores relevantes para avaliar uma estrutura, mas também perceber a importância de cada um deles através da comparação dos dois exemplos.

Neste contexto, a comparação de dois materiais estruturais diferentes torna-se também relevante, ainda para mais quando são materiais que rivalizam o protagonismo dos sistemas estruturais ao longo de toda a história da construção. Desta forma, este estudo serve também para fazer a comparação dos dois materiais estruturais por excelência e procurar as suas principais características que influenciam o comportamento sustentável do sistema. Através das ferramentas existentes no mercado, este estudo procurou as condições para realizar uma comparação realista entre o betão e o aço como materiais estruturais, procurando atingir valores ou classificações objetivas que consigam traduzir as diferenças entre os dois materiais, na perspectiva da construção sustentável.

1.3. Metodologia e Organização da Dissertação

O estudo foi desenvolvido em cinco partes principais, que apesar de serem independentes, estão interligadas e se completam entre si. A primeira parte surge como

introdução ao tema e apresentação do trabalho. Na segunda parte é apresentado o contexto da construção sustentável. Na terceira parte é feita a apresentação e o desenvolvimento do caso de estudo. A quarta parte surge como reflexão dos resultados obtidos anteriormente. Por fim, na quinta parte são feitas as reflexões finais e lançadas as perspectivas para o trabalho no futuro.

Depois de apresentado o tema e clarificadas as principais motivações deste trabalho, o segundo capítulo pretende apresentar o contexto atual da influência da sustentabilidade no sector da construção, esclarecendo os conceitos mais relevantes na construção sustentável e fazendo uma revisão dos processos existentes de avaliação da sustentabilidade e de análise do ciclo de vida dos materiais e sistemas construtivos. Neste capítulo pretende-se tomar consciência do contexto em que este estudo é feito, criando as bases necessárias para avançar com a comparação dos dois sistemas estruturais. Assim, é um capítulo principalmente descritivo, em que a principal preocupação passou por esclarecer os principais conceitos sustentáveis bem como as características mais relevantes das ferramentas existentes para a avaliação sustentável. A comparação e análise crítica destas metodologias não faz parte do âmbito deste trabalho, ainda que as opções feitas no desenvolvimento do caso de estudo acabem por revelar a visão mais pessoal e crítica dos métodos utilizados nas várias ferramentas. Neste capítulo, são ainda analisados vários estudos publicados sobre esta temática, onde são também realizadas operações de comparação entre materiais estruturais. Esta análise permitiu desenvolver relações de comparação com os resultados obtidos no caso de estudo deste trabalho, apresentadas no capítulo quatro.

Na apresentação do caso de estudo, na terceira parte do trabalho, foram estabelecidas as condições de comparação entre as duas estruturas, através da definição da unidade funcional, dos limites de estudo e da metodologia utilizada. Para este estudo, foram selecionados os indicadores considerados mais relevantes, baseados nos programas de avaliação de ciclo de vida já existentes, bem como nas bases de dados disponíveis. De maneira a considerar o desenvolvimento sustentável na perspectiva mais completa, este estudo procurou introduzir indicadores relacionados com as dimensões económica e social, visto que a maior parte dos estudos realizados sobre o mesmo tema centram as suas atenções quase exclusivamente na dimensão ambiental.

Para comparar o aço e o betão como materiais estruturais, através de critérios sustentáveis, a utilização de um caso de estudo permitiu aproximar os seus resultados à realidade. O caso de estudo adoptado foi o edifício da Extensão de Saúde da Gandra, situado no concelho de Paredes, perto do Porto. O edifício de um piso, apresenta uma área

aproximada de 500m². Apesar do projeto datar de 2004, a escolha deste edifício relacionou-se com a simplicidade da sua estrutura em betão armado, num desenho de pilares e vigas, conjugados com a organização espacial, que nos permite ter uma percepção mais objectiva do que realmente queremos avaliar, sem prender a atenção numa estrutura de desenho mais complexo.

Neste trabalho, foram estudados dois projetos de estruturas para este edifício, um representativo de cada material, concebidos de maneira a desempenhar a mesma função estrutural. A estrutura em betão armado a considerar está representada no projeto que integrou o processo de licenciamento do edifício, ainda que tenha sido construído mais tarde com algumas alterações, que aqui não foram consideradas. Esta estrutura é assim a que se enquadra melhor com o projeto global do edifício, sendo por isso adequado à organização arquitectónica que apresenta. O projeto de estrutura metálica foi desenvolvido especificamente para este estudo, sendo que é possível que o seu resultado se apresente desadequado ao projeto de arquitetura, concebido noutra altura e com outras premissas. Este factor teria noutro contexto grande relevância, devido à inevitável correspondência que projecto de arquitectura deve apresentar com o de estruturas. No entanto, no contexto que aqui é apresentado, este factor não se mostra relevante, pois não foi a arquitetura por si que foi avaliada, nem a influência que a escolha da estrutura teve no seu desenho, mas sim a comparação das duas estruturas em termos quantitativos, no que diz respeito à construção sustentável.

Devido às diferentes características mecânicas dos dois materiais, o dimensionamento de cada estrutura foi naturalmente distinto, bem como a sua massa prevista. Esta situação permitiu a comparação entre os dois materiais “em pé de igualdade”, isto porque a comparação entre 1 kg de betão e 1 kg de aço não faria sentido neste contexto e influenciaria negativamente a veracidade dos resultados, na perspectiva que se pretende estudar. A análise dos sistemas estruturais como conjunto de elementos definidos, e não como análise de quantificação de cargas, permitiu perceber que apesar de nos referirmos a estruturas de betão e estruturas metálicas, foram nas duas situações considerados os dois materiais em conjunto (tanto no betão armado com a colaboração de elementos de aço, como na estrutura metálica, em que as fundações foram consideradas também em betão). No entanto, neste contexto, foi evidenciado o material dominante.

A quarta parte do trabalho foi marcada pela consolidação dos resultados obtidos, interpretando-os com base em estudos realizados no mesmo âmbito. Esta análise permitiu também a reflexão sobre as diferenças implícitas nas várias metodologias. Os estudos já existentes, apresentados no final do capítulo 2, serviram de base para fazer a análise dos

resultados, tentando perceber as principais diferenças de cada metodologia e os seus efeitos na comparação final.

Por fim, no quinto capítulo, foi feito um balanço final do trabalho apresentado, fazendo referência aos pontos mais relevantes do estudo, bem como as principais conclusões que podem ser retiradas deste trabalho. Neste contexto, foram também apresentadas considerações para o desenvolvimento futuro deste tema, procurando responder a questões que não foram solucionadas neste trabalho.

Para além das referências bibliográficas apresentadas no sexto capítulo, foram apresentados em anexo os documentos com as informações do trabalho, fornecendo os dados que fizeram parte do desenvolvimento do caso de estudo e que permitem entender os resultados apresentados no capítulo três.

2. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

2.1. Construção sustentável

A sociedade reconhece atualmente a necessidade de encontrar o caminho para o Desenvolvimento Sustentável. Neste percurso, a construção desempenha um papel muito importante, não só pelo seu peso na economia e mas também pela sua responsabilidade na criação do ambiente construído, com grande impacto na qualidade de vida da população, através do conforto, segurança, saúde, bem-estar e produtividade dos seus ocupantes. Além disso, o sector da construção é um grande consumidor de recursos não renováveis, produtor massivo de desperdícios e ainda responsável por uma grande quantidade de emissão de gases nocivos para a saúde pública.

O conceito de Desenvolvimento Sustentável, definido pelo relatório Brundtland em 1987, apresenta-se como um conceito que se estende a aspectos sociais, económicos e ambientais, definido como “desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual sem comprometer as capacidades das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades” (Jalali e Torgal, 2010).

A construção, como motor económico, atividade construtiva e ambiente construído, tem um grande impacto na sociedade, podendo ser comprovado através do seu peso na economia mundial, na sua contribuição para o PIB de cada país, com especial incidência para os países desenvolvidos. As atividades construtivas exercem assim grande influência na economia local e global mas também provocam efeitos diretos no ambiente e na sociedade.

Por estas razões, torna-se evidente a necessidade de adaptar a construção a novos conceitos sustentáveis. Nesta perspectiva, surge, em primeiro plano, a procura de **otimização dos meios e recursos** utilizados, principalmente com uma visão estratégica a longo prazo, de maneira a manter o futuro viável. Este tema é especialmente relevante para os recursos não renováveis, tendo que se encontrar soluções alternativas à sua utilização. Neste ponto, as questões económicas são também evidenciadas, de maneira a considerar que a melhor utilização dos recursos e meios permite também a diminuição de custos e aproveitamento para outras áreas relevantes.

Um dos factores mais importantes na promoção da construção sustentável é a **adaptabilidade dos edifícios**. A reutilização das construções para diferentes programas permite acrescentar valor aos recursos já investidos. A flexibilidade da estrutura e dos

espaços são factores de grande relevância, pois colocam no futuro a esperança de se alterar o programa e a sua utilização, aproveitando o que já foi construído.

Outro factor importante para o desenvolvimento da construção sustentável é a **pré-fabricação de elementos construtivos**, que transforma o processo mais eficiente, rápido, simples e seguro. Os produtos pré-fabricados podem mais facilmente ser padronizados, testados e certificados, transformando-os em produtos com qualidade mais elevada. Este factor tem também mais-valias sociais, ao reforçar o trabalho permanente e estável, que beneficia a economia local e incentiva as relações da comunidade. A produção industrial de elementos de construção permite também a introdução das novas tecnologias na construção, nomeadamente o desenho apoiado em sistemas computadorizados, CAD, que aliado a software de produção, permite a criação de produtos de alta qualidade com desperdício muito reduzido.

Atualmente, a criação de aterros por causa do desperdício na construção é cada vez menos aceitável e muitas vezes ilegal, sendo a regulamentação desta área cada mais rigorosa. O desafio dos projetistas passa também por **minimizar o desperdício e emissões** durante as várias etapas de construção, que conduz, além de outras questões, a uma redução de custos. Pois quando se fala em desperdício, não se considera apenas os resíduos visíveis mas também o tempo e esforços que podem ser desperdiçados, procurando assim promover a ideia de executar o trabalho da melhor maneira e com o mínimo de repetições.

No seguimento deste factor e como grande bandeira da construção sustentável, surge a **reutilização e a reciclagem** dos elementos construtivos, no período de fim de vida do edifício. A reutilização implica a utilização dos elementos sem qualquer necessidade de alteração dos mesmos, assumindo assim as mesmas funções que assumiam anteriormente. Este método promove assim a redução de emissões e desperdícios. No entanto, a reciclagem envolve normalmente a transformação dos elementos antigos em novos produtos, utilizando-os como matéria-prima mas exigindo a repetição do processo de fabricação, com a produção de maiores quantidades de emissões e desperdícios. Em alguns materiais, como por exemplo o aço, o processo de reciclagem não resulta em produtos de menor qualidade, enquanto que muitas vezes, como acontece com o betão, o material reciclado não tem as mesmas características dos produtos originais, implicando a atribuição de novas funções para os produtos resultantes, como por exemplo, a utilização de betão estrutural reciclado em enchimento de pavimentos. Existe ainda a possibilidade dos materiais não poderem ser reciclados, sendo que a recuperação de alguns valores do

material, como por exemplo a incineração, pode ser uma estratégia de reduzir o desperdício, produzindo energia (Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012).

O **respeito pela biodiversidade**, associado à redução de desperdícios e emissões, mas também à utilização de materiais ecológicos, representa um dos principais objetivos da construção sustentável, associado muitas vezes à “construção verde”. Não sendo o único aspecto da construção com este tipo de preocupações, como muitas vezes é associado, é importante considerar a preservação do meio ambiente e dos recursos não renováveis.

A promoção da **eficiência energética** pode reduzir os custos de utilização do edifício, bem como contribuir para a preservação dos recursos não renováveis, como o gás, carvão ou petróleo, prevenindo o aquecimento global. A eficiência energética pode ser conseguida através da combinação de várias medidas como: redução das perdas de calor pela superfície envolvente do edifício (através do uso de materiais adequados), redução de cargas de arrefecimento, introdução de medidas de poupança de energia na utilização do edifício como aparelhos eléctricos energeticamente eficientes, instalação de sistemas de criação de energia, como painéis fotovoltaicos, e o maior aproveitamento da iluminação natural.

Em termos sociais, tendo em consideração o **respeito pelo ambiente local e pela população**, é importante considerar a diminuição dos impactos da construção de um edifício na sua envolvente, considerando relevante a rapidez de construção, a redução de poeiras, a maior utilização de elementos pré-fabricados (evitando a produção no local da obra), a diminuição do barulho e trânsito de camiões, a utilização de estruturas leves (que minimizam o movimento de terras e trabalhos de fundações) e o desenho de edifícios flexíveis e adaptáveis (potenciando ao máximo a construção do edifício). Ainda sobre o tema do desempenho social, é importante considerar a qualidade do ar interior, bem como o conforto acústico e térmico, características que têm em consideração o conforto dos habitantes dos edifícios.

O desenho e a construção de edifícios sustentáveis implica assim o balanço sensível de considerações sociais, ambientais e económicas.

A componente ambiental procura minimizar o impacto da construção e da utilização do edifício e pode ser representada por quatro factores principais: a análise LCA, a massa térmica, a utilização do solo e a reciclagem/reutilização (Cement Concrete & Aggregates Austrália, 2010).

A componente social promove a criação de um ambiente interior saudável, seguro e confortável, englobando cinco factores essenciais: integridade estrutural (segurança), vibração, proteção contra as intempéries, a resistência ao fogo e o comportamento acústico.

Por último, a componente económica procura minimizar os custos de construção e utilização do edifício, considerando cinco factores: custos de construção, custos de manutenção, reutilização do edifício, durabilidade e eficiência energética.

A estrutura assume um papel fundamental ao permitir ou condicionar a sustentabilidade do edifício, como resultado das opções iniciais de projeto. É assim da responsabilidade dos intervenientes da construção maximizar o potencial da estrutura a construir, pensando na reutilização do edifício e dos elementos construtivos, na utilização de materiais adequados e na sua contribuição para a eficiência energética, bem como na sua influência nos restantes factores da construção sustentável.

É na fase de projeto de um edifício que todas estas questões podem ser consideradas, tornando-se essencial a criação de metodologias e processos de apoio que permitam promover uma atitude pró-ativa no que diz respeito à construção sustentável.

Atualmente existem vários métodos de avaliação de sustentabilidade, associados às diferentes escalas do edifício, integrados em programas de investigação locais, mas também a um nível mais abrangente, adaptando-se a diferentes realidades, o que permite procurar uma visão cada vez mais global sobre o que é necessário para construir um edifício sustentável.

Os produtos de construção são constituídos por uma variedade de materiais e compõem cada um dos componentes do edifício. Por esta razão, o impacto de um produto deve ser sempre considerado no contexto em que é utilizado, e não isoladamente. Um dos exemplos mais relevantes desta situação são os materiais de isolamento, sendo que normalmente estão associados a grandes impactos ambientais na sua produção, mas têm um efeito verdadeiramente significativo na eficiência energética do edifício, tendo que ser considerado por isso o seu contexto, quando avaliado como produto (Andersen, 2012).

Os produtos de construção, devido à utilização de uma vasta gama de matérias-primas e às diferentes formas de fabricação, bem como às suas diferentes utilizações, podem ser responsáveis por muitos impactos ambientais em diferentes etapas do ciclo de vida. Entre os que têm maior relevância, surge a extração de recursos, principalmente quando se consideram agregados ou madeiras, que são utilizados praticamente no estado em que são extraídos, aumentando assim o peso deste impacto no seu ciclo de vida. Para materiais como metais e cimentos, é a fabricação a etapa do ciclo de vida que tem mais impacto no seu desempenho ambiental, ao envolver grandes quantidades de energia na sua produção. Na fase de transporte, os impactos são mais significativos quando a necessidade de produtos específicos de uma zona (como pode acontecer com as madeiras ou agregados) implicam uma deslocação significativa para o local de obra. Os impactos de

resíduos, produzidos em diferentes etapas do ciclo de vida (fabricação, manutenção e/ou demolição), são em muitos casos em quantidades significativas, mas atualmente são reutilizados, reciclados ou recuperados numa grande percentagem (Andersen, 2012).

Foram criadas metodologias que procuram ajudar os projetistas a escolher os materiais e produtos mais adequados a cada situação, no contexto da construção sustentável, procurando estabelecer o perfil ambiental de cada material através da análise dos recursos utilizados e as emissões associadas à vida útil do produto. Este estudo normalmente é desenvolvido para a fase “*cradle-to-gate*”, isto é, para o percurso da extração das matérias-primas até a conclusão da fase de fabricação, sendo que em algumas metodologias se analisa o produto em toda a sua expectativa de vida (Andersen, 2012).

Muitas associações procuram reunir os perfis ambientais dos materiais de construção numa base de dados, mas a consideração de diferentes critérios impede a realização desse objetivo. Por esse motivo, a Comissão Europeia promoveu a criação de normas gerais para a avaliação da sustentabilidade de materiais e edifícios, a que se associa o CEN/TC 350. A harmonização de algumas questões sobre a sustentabilidade e a sua avaliação permite o livre comércio e a consequente concorrência de produtos e materiais de construção dentro da União Europeia, ao encontro do mercado único.

2.2. Análise do ciclo de vida

2.2.1. Âmbito, objetivo e etapas LCA

A análise de ciclo de vida, LCA, fornece informação sobre os recursos, emissões e outros impactos resultantes do ciclo de vida de um material, podendo analisar o seu desempenho desde a extração até ao final de vida. Este método permite avaliar os impactos ambientais do produto, identificando e quantificando os fluxos de material e energia envolvidos na sua utilização.

Historicamente, o primeiro estudo de impacto de um produto foi realizado pela Coca-Cola, nos EUA, em 1969. Este estudo procurava avaliar os recursos necessários e a carga ambiental dos diferentes recipientes existentes no mercado para condicionar a bebida em causa. Desde aí, os estudos sobre o impacto ambiental sucederam-se, motivados também pela crise do petróleo de 1970, desenvolvendo metodologias de análise do ciclo de vida e padrões internacionais para uniformizar a avaliação (Andersen, 2012).

Uma análise de ciclo de vida permite avaliar um produto ou sistema nas seguintes etapas: extração de materiais e combustíveis utilizados para adquirir a energia necessária;

fabricação de componentes de construção; transporte de materiais e componentes; montagem e construção; utilização (incluindo o consumo de energia, manutenção, reparação e renovação); demolição, reciclagem ou reutilização do produto no final da sua vida útil. Nestas etapas devem ser considerados os indicadores representativos dos impactos do produto estudado, sendo que a seleção destes indicadores é de grande relevância no resultado final da análise (<http://www.concretethinker.com>).

O sistema LCA apresenta uma metodologia definida por vários passos – definição de objetivo, âmbito do estudo, análise de inventário, avaliação do impacto e interpretação dos resultados (Figura 1). O processo LCA tem como primeiro passo a utilização de dados do Inventário de Ciclo de Vida (LCI) de todos os materiais utilizados na produção e construção do produto final. A distinção entre uma análise LCA e uma análise LCI passa pelo tratamento de resultados, isto é, uma LCA distribui os dados LCI pelas categorias de impacto ambiental definidas através da classificação e estuda a contribuição de cada um através da caracterização, sendo que o mesmo dado LCI pode influenciar mais do que uma categoria (Bragança e Mateus, 2011). A classificação implica, em primeiro lugar, a selecção dos indicadores que vão constituir o estudo, sendo que “os indicadores não representam a medição exata de um efeito ambiental. O indicador é a medição de algo que a maior parte dos cientistas acredita que está co-relacionada diretamente com os efeitos” (Hindman, 2011).

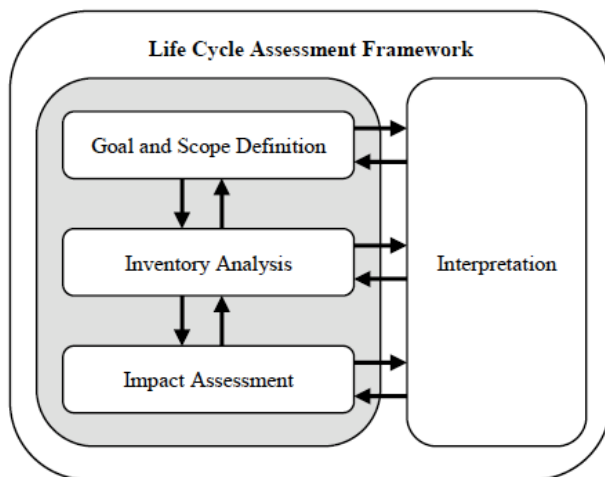


Figure 1 - Esquema das etapas da avaliação sustentável (Ochsendorf, Norford, Brown, Durschlag, Hsu, Love, Santero, Sweit, Webb e Wildnauer, 2011).

A classificação e a caracterização são as etapas obrigatórias de uma análise LCA, sendo que, dependendo do objetivo da análise, se podem considerar mais etapas no estudo, como a normalização e a agregação. A normalização é um processo de conversão dos valores associados a cada impacto numa mesma unidade, de maneira a ser possível

comparar as várias categorias em estudo. A agregação, por sua vez, atribui um peso relativo a cada uma das categorias, na perspectiva de determinar indicadores gerais de avaliação do desempenho ambiental (Andresen, 2012). Esta etapa é uma das mais controversas deste processo pois a atribuição de diferentes importâncias relativas aos indicadores nem sempre é consensual e tem uma influência direta nos resultados.

A análise LCA envolve assim uma grande quantidade de dados e a sua manipulação, permitindo que diferentes métodos (por exemplo, consideração de diferentes indicadores e respectivos pesos) atinjam diferentes resultados. Esta é uma das características mais delicadas desta área de investigação, pois a credibilidade dos estudos é posta em causa por discrepâncias nos resultados dos mesmos produtos. Assim, torna-se importante chegar a um consenso na comparação de produtos, pelo que devem ser estabelecidas à partida as mesmas condições de análise e manter essa coerência até ao final do estudo.

Uma análise LCA é assim um processo complicado e moroso, pois implica a consideração de muitos dados e a sua gestão, sendo que contribuem para esta complexidade factores como o aumento da esperança de vida dos edifícios, a reduzida padronização dos edifícios construídos e a extensa lista de materiais, processos e sistemas que a construção de um edifício envolve. É ainda importante ter noção de que uma análise LCA não é uma simples adição de propriedades quantificadas, mas sim o resultado de um conjunto de decisões, que envolvem questões significativamente subjetivas. Por esta razão, propõe-se muitas vezes uma análise de sensibilidade, de maneira a alterar pressupostos feitos ao longo da análise LCA e perceber como influenciam os resultados e as conclusões finais.

Existem dois tipos de análise LCA para os produtos de construção: as avaliações genéricas, que procuram agrupar dados de vários fabricantes para criar uma média do mesmo produto; e a avaliação específica do produto, normalmente apresentada como propriedade de um fabricante. Esta serve para resolver questões internas, de melhoria de produção ou cumprimento de metas desejadas, mas também para ser apresentado ao exterior, de maneira a competir com produtos concorrentes (Andersen, 2012).

2.2.2. Inventário do ciclo de vida

O inventário de ciclo de vida (LCI) implica o estudo detalhado de todos os fluxos dentro e fora do sistema: recursos e matéria-prima, tipo de energia utilizada e libertação de emissões para o ar, água e terra. O objetivo de um inventário LCI é assim identificar todas

as entradas e saídas de fluxos do processo considerado, incluindo todas as etapas que fazem parte do âmbito do estudo. Este tipo de análise pode tornar-se muito complexa e pode envolver vários processos individuais na cadeia de produção. Os dados LCI podem então ser considerados em termos de potencial de impacto, como indicadores intermédios, que embora não respondam a conclusões finais de impacto ambiental, podem permitir resumir e comparar os dados do inventário, tirando conclusões sobre a redução de fluxos. Para obter os dados LCI existem vários métodos no mercado, como as bibliotecas fornecidas pelo software de LCA ou a pesquisa na internet, através de páginas específicas que disponibilizam essa informação.

O Ecoinvent é uma metodologia criada no Centro Suíço de base de dados e inventários do Ciclo de Vida (LCI) e avaliação de impacto do ciclo de vida (LCIA). Esta é uma das bases de dados mais utilizadas na análise de ciclo de vida na Europa pois contém dados sobre mais de 4000 processos industriais, é bem documentada e é atualizada regularmente. De um modo geral, é considerada uma base de dados fiável e coerente.

2.2.3. Regulamentação LCA

A partir de 2004, com a evolução dos métodos de avaliação sustentável, tornou-se necessário estabelecer uma Norma Europeia, que regulamentasse a avaliação de LCA na área da construção. Assim, a Comissão Europeia desenvolveu regulamentações para a “sustentabilidade da construção” com o “European Committee of Standardization” (CEN). A Norma Europeia, EN 15978:2011 – “Sustainability of Construction Works – Assessment of Environmental Performance of Buildings – Calculation Method” (CENT/TC 350), faz parte de um conjunto de normas, especificações e relatórios técnicos que promovem a avaliação do desempenho ambiental dos edifícios, e servem de suporte para a quantificação da sua contribuição para a construção e desenvolvimento sustentável.

“O objetivo desta Norma Europeia é fornecer regras de cálculo para a avaliação do desempenho ambiental dos edifícios novos e existentes. Esta norma é parte de um conjunto de normas europeias, especificações técnicas e relatórios técnicos para a avaliação do desempenho ambiental dos edifícios que, juntas, suportam a quantificação da contribuição do edifício avaliado para a construção e desenvolvimento sustentável” (<http://www.worldgbc.org>). Esta norma destina-se a apoiar a fase de projeto com base na avaliação do desempenho ambiental de um edifício, principalmente na avaliação do ciclo de vida (LCA). No entanto, estas normas apenas cobrem a medição, cálculo e descrição dos impactos do ciclo de vida do edifício, sendo que a avaliação da influência de cada impacto

está fora do âmbito destas normas. As etapas do LCA, segundo a norma ISO 1040:2006, consistem na definição de objetivos e âmbito do estudo, na análise de inventário e na avaliação dos indicadores, conduzindo estas três etapas a interpretações dos resultados, promovendo o desenvolvimento dos produtos (CENT/TC 350, 2011).

O desempenho ambiental de um edifício é apenas um dos pilares da avaliação da sua sustentabilidade, sendo que o desempenho económico e social têm que ser também considerados na avaliação de sustentabilidade, como é descrito nas normas EN 15643-1:2010, EN 15643-2:2011, EN15643-3:2012 e EN15643-4:2012 (Figura 2).

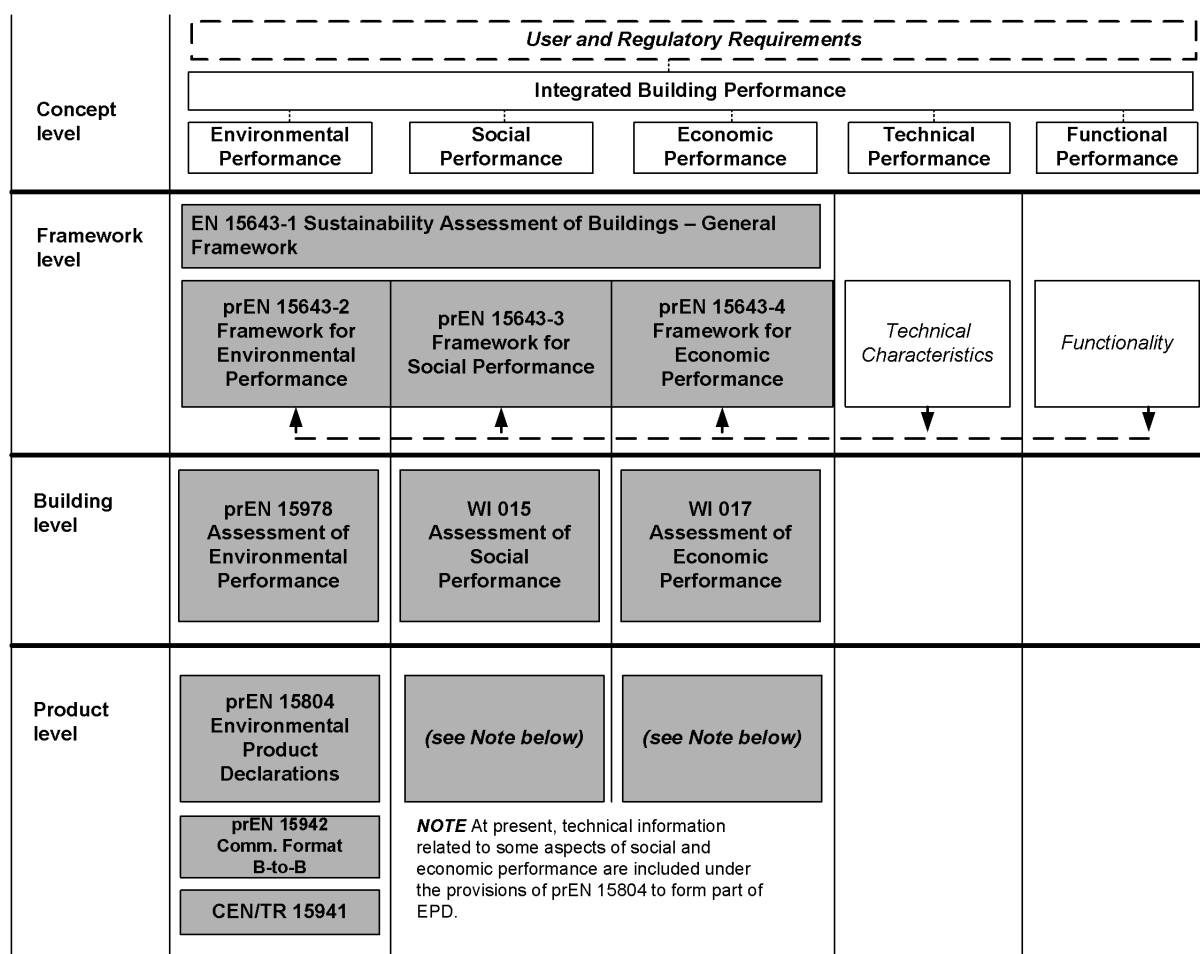


Figure 2 - Programa de trabalho proposto pela Norma Europeia (CENT/TC 350, 2011).

A Norma Europeia destina-se a apoiar a documentação da avaliação do desempenho ambiental de um edifício. O método para quantificar este desempenho é baseado na avaliação LCA e os requisitos gerais para a avaliação estão descritos na norma EN 15643-1:2010. Esta norma é aplicável a edifícios novos e a edifícios existentes, bem como a projetos de reabilitação, e fornece informação sobre os limites do sistema em que

se aplica a avaliação do edifício, o procedimento a ser utilizado para a análise de inventário e a lista de indicadores e procedimentos para o seu cálculo.

A avaliação considera todas as fases do ciclo de vida do edifício e inclui todos os produtos, processos e serviços utilizados para a construção, utilizando as declarações de produto ambiental (EPD), os "módulos de informação" (EN 15804:2012 – Figura 2) e outras informações relevantes para a avaliação do desempenho ambiental do edifício. A interpretação dos resultados não está dentro do âmbito da norma, resumindo-se assim apenas à quantificação do comportamento ambiental do edifício.

Para calcular o desempenho ambiental segundo esta Norma Europeia, é necessário definir à partida o objetivo da avaliação, bem como o seu alcance e utilização prevista da informação obtida. Um dos âmbitos da avaliação considerados neste documento é a assistência ao processo de tomada de decisão, utilizando a informação obtida para realizar a comparação do desempenho ambiental de diferentes opções de projeto.

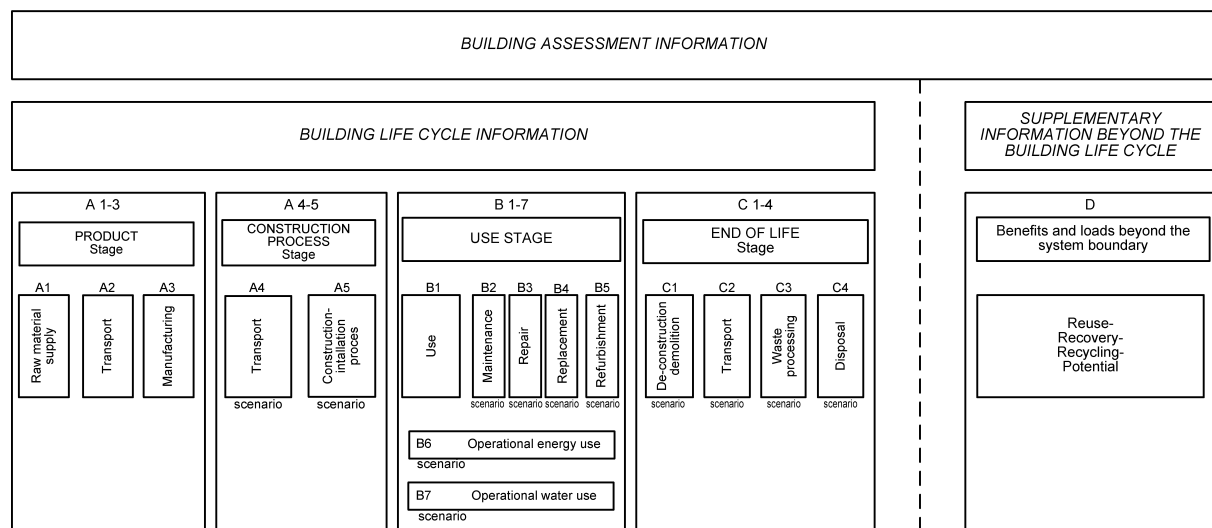


Figure 3 - Esquema dos módulos para as diferentes fases do ciclo de vida da avaliação sustentável (CENT/TC 350, 2011)

Podemos distinguir as quatro etapas do ciclo de vida: a produção (A 1-3), a construção (A 4-5), a utilização (B 1-7) e o fim de vida (C 1-4). Em cada uma das etapas principais são consideradas categorias que permitem distinguir o tipo de atividade a considerar. Este esquema procura generalizar todos os passos de cada processo, sendo que não significa que todos os objetos de estudo tenham que passar exatamente por cada uma destas etapas. Isto implica que esta informação generalizada tem que ser adaptada a cada situação.

O âmbito da análise de LCA pode ter diferentes limites, conforme considera as várias fases do ciclo de vida. Assim, quando se considera o produto e a produção está em causa uma análise “Cradle-to-Gate”, que tem em conta todas as etapas pelo que o produto passa desde a extração de matérias-primas até à conclusão do seu processo de fabricação. Quando são consideradas as fases de utilização e fim de vida, considera-se uma análise “Gate-to-Grave”. Quando consideramos os dois tipos de análises anteriores em conjunto, estamos a considerar uma análise “Cradle-to-Grave”, que engloba desta forma todas as etapas do ciclo de vida. Existe ainda um outro tipo de análise, “Cradle-to-Cradle”, que vai mais além da análise referida anteriormente, pois permite incluir a reciclagem dos produtos utilizados. Desta forma, a meta desta análise representa já o ponto de partida de um outro ciclo de vida.

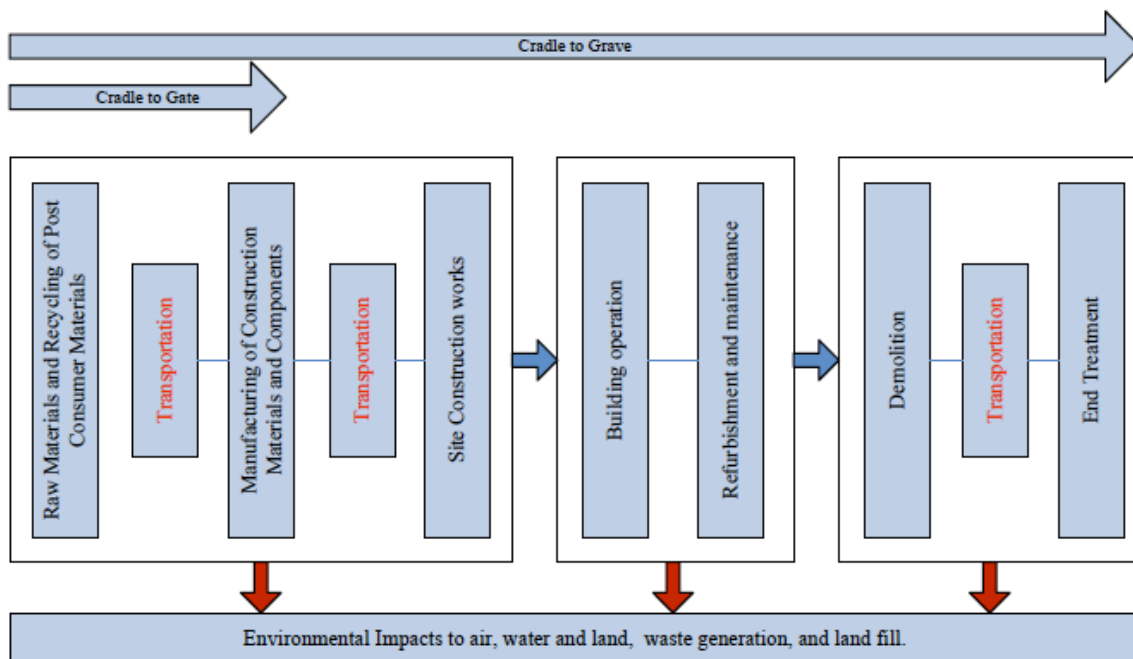


Figure 4 - Diagrama do âmbito do estudo consoante as fases de ciclo de vida consideradas para a avaliação sustentável (Khasreen, Banfill e Menzies, 2009).

Para cada uma das categorias, a avaliação tem que considerar um conjunto de indicadores, que devem representar os impactos quantificados e a influência ambiental durante o seu ciclo de vida. Esta norma apresenta indicadores ambientais baseados nos métodos de cálculo assumidos, mas não apresenta qualquer metodologia para a agregação desses indicadores. A Norma 15978:2011 apresenta 24 indicadores ambientais, divididos em quatro grupos: impacto ambiental, uso de recursos, desperdícios e fluxos de saída:

Indicadores de Impacto Ambiental

- Potencial de aquecimento global (GWP)
- Potencial de destruição do ozono (ODP)
- Potencial de acidificação (AP)
- Potencial de eutrofização (EP)
- Potencial de formação de ozono troposférico (POCP)
- Potencial de destruição abiótica de elementos (ADP-elementos)
- Potencial de destruição abiótica de recursos fósseis (ADP-recursos fósseis)

Indicadores de Uso de Recursos

- Uso de energia primária renovável excluindo renováveis de recursos energéticos primários utilizados como matérias-primas
- Uso de recursos renováveis de energia primária utilizadas como matérias-primas
- Uso total de recursos renováveis de energia primária (energia primária e de recursos energéticos primários utilizados como matérias-primas)
- Uso de energia renovável não primária excluindo os não renováveis de recursos energéticos primários utilizados como matérias-primas
- Uso de fontes de energia não renováveis primárias utilizados como matérias-primas
- Uso total de recursos não renováveis de energia primária (energia primária e de recursos energéticos primários utilizados como matérias-primas)
- Uso de material secundário
- Uso de combustíveis secundários renováveis
- Uso de combustíveis secundários não renováveis
- Uso de água doce líquida

Indicadores de Desperdício

- Resíduos perigosos eliminados
- Resíduos não perigosos eliminados
- Resíduos radioativos eliminados

Indicadores de Fluxo de Saída

- Componentes para reutilização
- Materiais para reciclagem
- Materiais para recuperação de energia
- Energia exportada

Os valores para cada um dos indicadores são calculados para cada módulo nas fases do ciclo de vida baseado no cálculo da respectiva matriz. O princípio básico para este

cálculo consiste na multiplicação de cada produto e serviço quantificado num módulo do ciclo de vida do edifício, com o seu respectivo valor para cada indicador ambiental. Este cálculo é aplicado da mesma forma para os sete indicadores de impacto ambiental.

A base da avaliação está na fiabilidade das informações bem como na maneira como são utilizadas no processo de cálculo, isto é, na escolha dos indicadores a considerar e na relação entre eles, nomeadamente, o peso que cada um contribui para a avaliação global (CENT/TC 350, 2011).

A avaliação LCA tem sido utilizada nos últimos anos na indústria da construção em vários países europeus, como Reino Unido, Áustria, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Holanda e Suécia para avaliar o impacto ambiental da fabricação de materiais de construção. As normas internacionais relacionadas com a análise LCA são as ISO 14040 e ISO 14044 e, mais especificamente para as declarações do tipo III ambientais (ISO 14025: 2006), mais conhecido como Declaração de Produto Ambiental (EPD), ferramenta que grande parte dos países utiliza para essas avaliações.

2.2.4. Ferramentas LCA

Há várias metodologias LCA orientadas para o apoio à construção, desenvolvidas em regiões diferentes e por isso com abordagens específicas: Lisa, SimaPro, BEES, ATHENA, GaBi (www.epa.gov). Por essa razão, é preciso ler os resultados dos estudos desenvolvidos por estas metodologias no seu contexto regional.

A ferramenta **Lisa**, como ferramenta de apoio à construção criada no Reino Unido, procura identificar as principais questões ambientais com base nas análises LCA e permite avaliar as consequências das opções feitas em cada projeto, através de um sistema fácil acesso (<http://www.lisa.au.com>).

O programa **SimaPro** é uma ferramenta de software profissional LCA, desenvolvida na Holanda, apoiada na base de dados Ecoinvent. Esta ferramenta permite comparar e analisar os produtos de construção, mesmos os mais complexos e com diferentes ciclos de vida. A flexibilidade de utilização é umas das características mais relevantes desta ferramenta, que através da modelação parametrizada e da análise de resultados interativa, permite a percepção dos pontos fracos que influenciam o resultado final da análise LCA. Esta ferramenta é apresentada no mercado em diversas versões consoante o objetivo da análise, como a versão Compact, para resultados mais objetivos e rápidos, ou a versão Analyst, para resultados mais complexos, com modelação mais parametrizada e análise de cenários diferentes ou o Developer, para especialistas LCA que necessitam de acesso a

ferramentas externas, apresentando desta forma interfaces adaptados a outros programas. (<http://www.simapro.co.uk>).

O software **GaBi** permite determinar o ciclo de vida de qualquer produto ou sistema, fornecendo as informações necessárias para as empresas ou utilizadores perceberem os impactos associados. Apresentando bases de dados acessíveis e atualizadas, com cerca de 4700 LCI, este programa permite não só a determinação dos impactos ambientais mas também económicos, através da análise de respectivos custos, acrescentando ainda alternativas para a sua fabricação, distribuição, reciclagem, etc. de maneira a corresponder melhor às expectativas dos utilizadores e produtores. De fácil manuseamento para utilizadores não especializados, este programa permite a análise dos processos em cadeia, promovendo cenários com melhor desempenho. Este programa permite ainda a realização de relatórios, simples para não especialistas e mais complexos para usuários mais experientes em análises LCA (<http://www.gabi-software.com>).

O programa **BEES** (Building for Environmental and Economic Sustainability) foi desenvolvido pelo National Institute for Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, nos EUA. Pode ser usado para analisar o desempenho ambiental e económico de produtos de construção, servindo de apoio aos projetistas, construtores e fabricantes de produtos. Inclui dados reais de desempenho ambiental e económico para 230 produtos de construção. A ferramenta, apoiada nas normas ISO 14040, pode ser utilizada online, onde é permitido analisar todas as fases da vida de um produto. O desempenho económico é também considerado, utilizando o método de custo padrão de ciclo de vida, onde são incluídos os custos de investimento inicial, a construção, a utilização e eliminação. O desempenho ambiental e económico são combinados numa medida de desempenho geral, que pode ser manipulada pelo utilizador, conforme os pesos que se queira atribuir a cada indicador (<http://ws680.nist.gov/Bees/>).

A ferramenta **ATHENA**, Institute's Impact Estimator for Buildings, desenvolvido no Canadá, permite aos arquitetos, engenheiros e investigadores obterem a avaliação do ciclo de vida (LCA) em projetos de edifícios novos ou reabilitações de edifícios existentes. O software tem uma base de dados abrangendo mais de 90 materiais estruturais e de revestimento. Este simula mais de 1.000 combinações de montagem diferentes. Os impactos ambientais considerados são: uso de recursos, potencial de aquecimento global, índice de toxicidade do ar, índice de toxicidade da água, emissão de resíduos sólidos e energia incorporada. Desta forma, esta ferramenta permite ser utilizada em produtos de construção mas também em sistemas construtivos ou edifícios (<http://www.athenasmi.org>).

A Comissão Europeia criou a **Plataforma Europeia de LCA**, onde disponibiliza base de dados, ferramentas e serviços, para a integração destes sistemas no desenvolvimento de produtos e na formulação de políticas públicas, com informações de custo livre e independente. A plataforma é composta por duas áreas principais: a base de dados europeia ELCD (European Reference Life Cycle Database) e o Diretório de Recursos LCA, apresentado recentemente. A base de dados ELCD reúne informação dos materiais, consumo de energia, transporte e gestão de resíduos, com especial relevância na qualidade dos dados, consistência e aplicabilidade. O Diretório de Recursos LCA permite a partilha de estudos LCA entre a comunidade, com as informações mais relevantes de cada estudo, e também das bases de dados, ferramentas e serviços. As informações cedidas pela plataforma são livres de encargos e não apresentam restrições, mas são apresentadas principalmente para especialistas e profissionais de análise LCA (<http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/index.vm>).

Atualmente, são poucos os programas que integram o impacto operacional do edifício com o impacto incorporado, sendo que é também previsível que num futuro próximo estes dois temas sejam considerados em conjunto. As ligações entre os produtos construtivos e o desempenho operacional do edifício são muitas, isto é, a escolha e disposição dos produtos podem afectar a massa térmica, a ventilação, a iluminação e o comportamento acústico, entre outros factores. Isto implica que a escolha de materiais seja feita não só pela análise dos respectivos impactos incorporados, mas também pelos efeitos que essa escolha pode implicar no ambiente construído.

A análise LCA é normalmente efetuada depois do produto estar implementado no mercado, sendo que o reconhecimento dos impactos ambientais e as potenciais sugestões de melhoria para o desempenho do produto surgem depois do processo estar implementado e por isso mais difícil de alterar. Seria assim mais proveitoso que esta avaliação de desempenho fosse feita numa fase mais precoce da produção, especialmente da fase de desenho do produto. (Marosky, Dose, Fleischer e Ackermann, 2007)

A possibilidade de integrar a análise LCA na fase de projeto do produto pode ser conseguida através da ligação de software de desenho assistido por computador (CAD) e ferramentas de LCA. Desta forma, ao desenharem os produtos, os projetistas podem escolher as características, materiais e especificações tendo em consideração também o desempenho ambiental. Assim, ao definir o produto, fica também definido seu desempenho ambiental previsto.

A adaptação do software existente ou a criação de novas ferramentas que permitam a circulação de dados entre as plataformas CAD e LCA, parece cada vez mais relevante, na

perspectiva de simplificar o trabalho para quem mostra interesse na importância do comportamento ambiental do seu produto, mas que não sabe ou não tem tempo suficiente para se dedicar a comparar as análises LCA de cada uma das suas escolhas. De qualquer forma, a possibilidade de se tornar numa realidade e de fácil acesso ainda não estará próxima, pois estes programas são ainda complexos e a informação é ainda processada de uma maneira pouco prática (Marosky, Dose, Fleischer e Ackermann, 2007).

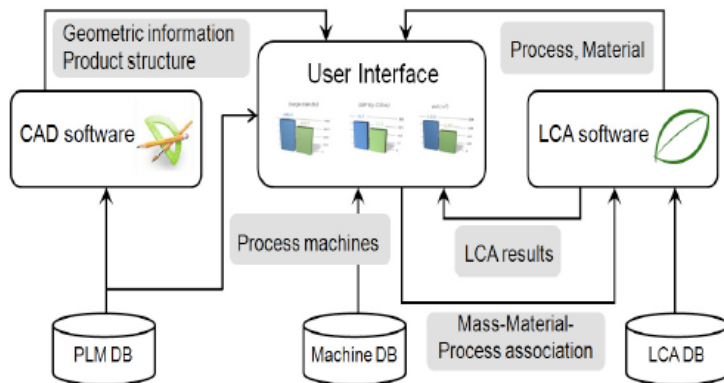


Figure 5 - Esquema de colaboração entre os sistemas LCA e CAD (Morbidoni, Favi, Mandorli e Germani, 2012).

Ao nível do edifício, existem já ferramentas LCA que fazem a ligação com modelos CAD, como por exemplo o Sustainable Building Specifier (Alemanha) e LCADesign (Austrália) (Andersen, 2012). Este tipo de ferramenta pode permitir a colaboração direta das análises LCA no projeto de um edifício, promovendo a percepção, praticamente automática, da previsão dos impactos produzidos por cada uma das escolhas feitas pelos projetistas.

A utilização de ligação de sistemas LCA com software de modelação (Building Information Models - BIM) é um processo em grande desenvolvimento, sendo espectável o aparecimento de mais programas interligados. Estes permitirão, a longo prazo, um modelo LCA mais completo e a integração da simulação da utilização do edifício numa fase de projeto. Desta forma, além de fazer um balanço dos resultados dos impactos dos materiais e processo de fabricação, estes programas farão a previsão do comportamento do edifício ao longo do seu tempo de vida (Wang, Shen e Barryman, 2011).

A definição antecipada do comportamento do produto, no momento em que é definido, vem colaborar com a ideia de que a atitude para seguir o caminho da construção sustentável tem que se apresentar pró-ativa, antecipando os erros e melhorando os resultados.

2.3. Declaração ambiental de produto

As Declarações Ambientais dos produtos de construção (EPD) permitem identificar os produtos que cumprem as indicações gerais para a sustentabilidade. Atualmente, as EPD são voluntárias mas o interesse das empresas em apresentarem os seus produtos com EPD é cada vez maior, não só pela possibilidade de ser associado a incentivos financeiros, mas também por apontar para o caminho da responsabilidade individual ambiental.

Assim, de maneira a comunicar os dados LCA num formato generalizado, a indústria da construção desenvolveu as EPD, que permitem comparar produtos, quando são utilizadas as mesmas Regras de Categoria de Produto (PCR). Todos os programas de EPD devem estar de acordo com ISO 14040 e ISO 14044 (normas internacionais de LCA), a ISO 14025:2006 (norma internacional de EPD) e a mais recente EN 15804:2012. Nas PCR está descrito como deve ser feita a análise do ciclo de vida bem como a listagem das categorias de impacto ambiental que deverão ser analisadas. No entanto, estas normas deixam muitos aspectos por definir, resultando assim em diferentes PCR e consequentemente em diferentes EPD.



Figure 6 - Esquema do processo de EPD (Andersen, 2012)

A EPD de 1kg de betão não pode ser comparado com o EPD de 1kg de aço estrutural, sendo que os produtos devem ser considerados no seu sistema/nível de edifício, com a mesma funcionalidade, como por exemplo, comparando a massa de cada elemento que desempenhe a mesma função estrutural. Este critério vem acrescentar uma maior complexidade à avaliação de ciclo de vida e à comparação entre produtos e materiais (Andersen, 2012).

As EPD permitem fornecer informação sobre o desempenho ambiental de um produto, fazendo desenvolver o mercado ao estimular a oferta e procura de produtos com

melhor comportamento ambiental, introduzindo desta forma a necessidade das empresas envolvidas responderem melhor às questões sustentáveis.

2.4. Análise do custo do ciclo de vida

A análise do custo do ciclo de vida, LCCA, fornece informação sobre os custos associados ao ciclo de vida de um material ou produto, desde a extração até ao fim de vida. É desta forma uma ferramenta importante usada para tomar decisões económicas, por exemplo, na escolha dos materiais de construção. A análise consiste na contabilização de todos os custos de um determinado produto ou sistema durante a sua vida útil. O custo de ciclo de vida é igual ao custo de construção mais o valor presente da utilidade futura, a manutenção e os custos de substituição durante a vida útil do produto. Este método permite comparar, em termos económicos, várias alternativas de construção, que podem considerar diferentes factores de fluxo mas permitem assumir um padrão semelhante de serviço. É importante considerar um ciclo de vida no seu conjunto, pois é possível que uma construção inicial mais barata possa implicar uma maior manutenção e desta forma acabar por gerar custos mais elevados, no seu balanço final. Assim, é importante procurar esclarecer no momento do projeto, quais os custos reais das várias alternativas ao longo do ciclo de vida, assumindo ainda assim que os valores desta análises são sempre especulativos (<http://www.concretethinker.com>).

A análise de custo de ciclo de vida é mais direta e objetiva do que a análise de desempenho ambiental, sendo que a informação é mais acessível e mais fácil de interpretar. Apenas o valor residual previsto para a expectativa de vida útil do edifício pode acrescentar alguma subjetividade a esta análise, mas são normalmente assumidos valores consensuais e apoiados em avaliações económicas globais. A análise inclui normalmente o investimento inicial, os custos associados à utilização e manutenção e os custos de demolição e transporte para aterro. Os valores residuais que representam o potencial de reciclagem não são normalmente considerados, por serem frequentemente especulativos.

Life-cycle costs =	Initial Investment Costs
	+ (PV) Replacement Costs
	- (PV) Residual Value
	+ (PV) Energy Costs
(PV = Present Value)	+ (PV) Operation, Maintenance & Repair (OM&R)

Figure 7 - Equação da análise LCCA (Rist, 2011).

Quando são feitas comparações entre o LCCA de dois produtos ou de dois edifícios, é importante que seja considerado o mesmo período de tempo, ainda que possa não ser expectável que o período de vida útil do objeto de estudo seja semelhante, pois o valor monetário dos materiais, serviços ou do próprio dinheiro sofre variações e pode influenciar a análise.

Existem várias base de dados disponíveis no mercado e são de fácil acesso e compreensão para o cálculo dos custos iniciais, como é o caso da publicação *Informação sobre custos na construção* (Fonseca, 2008), atualizada regularmente, que se apresenta como uma base de dados recomendável para a elaboração de análise de custos de ciclo de vida. Para o cálculo dos custos de utilização é mais difícil de obter informação adequada, sendo que pode ser cedida pelos produtores, sobre os respectivos produtos, ou por programas de LCA que contemplem a análise de custos e a fase de utilização.

2.5. Avaliação e certificação sustentável

Existem várias metodologias de avaliação de sustentabilidade de um edifício, promovendo o equilíbrio entre as considerações ambientais, económicas e sociais. Os sistemas de certificação e classificação servem para promover a construção sustentável integrando as preocupações ambientais, económicas e sociais nos critérios de decisão de projeto. Os vários sistemas existentes apresentam perspectivas distintas, através da seleção de diferentes critérios mas têm em comum o objetivo de promover a diminuição dos impactos negativos da construção sobre o Homem e a sociedade (Trusty e Horst).

Assim, todos os sistemas têm objetivos comuns, como a otimização do local de implantação, a preservação da identidade regional e cultural, minimização do consumo energético, utilização de materiais eco-eficientes, a proteção e conservação de recursos, a promoção de condições de saúde e conforto, a otimização de práticas de utilização e manutenção e a minimização de custos envolvidos, tanto de investimento como de utilização (Bragança e Mateus, 2011).

Um dos pontos mais frágeis destes sistemas é o critério de seleção de materiais, tendo em consideração que a própria definição de material sustentável é um pouco subjetiva. A integração de técnicas e ferramentas apoiadas na avaliação LCA fazem parte da solução para este problema, ainda que seja necessário introduzir outros critérios relevantes na avaliação da sustentabilidade, mas que são mais difíceis de definir e quantificar, como sejam os critérios económicos e sociais. O problema tem como base o contexto em que os critérios e as pontuações são atribuídos na classificação dos sistemas

no que diz respeito à escolha do material. A atribuição de créditos surge, em muitos casos, de um entendimento consensual e convencional, nem sempre alicerçado numa análise objectiva. Um dos exemplos desta situação pode verificar-se na utilização de materiais reciclados, assumindo que inevitavelmente implicam uma redução de cargas ambientais. No entanto, isso pode não ser verdadeiro em todos os casos, pois o processo de reciclagem pode implicar a utilização de mais energia e provocar mais impactos no ambiente do que a produção do material novo (Trusty e Horst). A questão não é a maior importância de um factor em relação a outro mas as suposições comuns que podem induzir a erros nas tomadas de decisão. O problema da reciclagem pode ser associado, desta forma, à expressão: os meios justificam os fins. De qualquer maneira, a reciclagem teve sempre como objetivo a redução dos fluxos de e para a natureza mas a evolução técnica pode por em causa este objetivo em algumas situações (Trusty e Horst).

Outro exemplo de critérios utilizados nos sistemas de avaliação é o uso de materiais rapidamente renováveis. A intenção é compreensível, sendo dada importância à redução do uso e esgotamento de materiais que necessitam de muito tempo para se renovarem. A definição de “rapidamente renovável” está relacionada com um período de tempo de menos de 10 anos, na metodologia LEED, o que desde logo levanta o problema da ausência de justificação deste critério, surgindo um pouco arbitrária. Por outro lado, este critério ignora o valor da terra como recurso finito, bem como as implicações de fertilizantes, pesticidas, insecticidas, etc., que podem ser utilizados na produção de materiais rapidamente renováveis mas que implicam efeitos negativos não considerados (Trusty e Horst). Existem problemas similares na classificação do uso de energia, ao promover o uso da energia mínima sem se preocupar com a forma de energia em si e as suas implicações secundárias.

A avaliação da sustentabilidade do edifício como um todo, feita por metodologias como o BREEAM ou o LEED, permite classificar o desempenho ambiental, económico e social, servindo de demonstração e inspiração para a prática de uma construção sustentável nos três pilares da sustentabilidade.

O tratamento da informação sobre os materiais varia de sistema para sistema, indo de uma simples “checklist” até à integração de uma análise LCA de todos os produtos envolvidos na construção. Desta forma, todos integram a consideração do impacto ambiental dos produtos construtivos, mas utilizando diferentes estratégias para o avaliar, atingindo resultados incomparáveis e até, muitas vezes, contraditórios. A maioria destes programas considera o impacto ambiental global de um edifício resultante do somatório do impacto de cada um dos seus componentes.

Um dos programas mais utilizados é o **BREEAM** (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method), desenvolvido nos anos 90. Este programa faz a avaliação do comportamento de um edifício nas seguintes áreas: gestão, utilização energética, saúde e bem-estar, poluição, transporte, utilização do território, ecologia, materiais e água. A utilização destes dados é feita através de diferentes pesos, de maneira a procurar dar o valor correto a cada um dos factores. Para atribuir valores de avaliação aos impactos, o BREEAM utiliza um guia, o *Green Guide*, desenvolvido pelo BRE (Building Research Environmental) para ajudar a encontrar as soluções mais sustentáveis para os edifícios. Uma parte da classificação, cerca de 12%, do BREEAM está associada a créditos sobre materiais, na perspectiva de encorajar o uso de materiais de construção com reduzidos impactos incorporados (<http://www.breeam.org>).

Outros dos programas mais reconhecidos para a avaliação da sustentabilidade é o **LEED**, desenvolvido pelo US Green Building Council, em 2000. A abordagem do ciclo de vida integrada neste sistema começou por ser feita através de uma “cheklist” que avalia o conteúdo reciclado, renovado e o abastecimento local. Esta abordagem podia simplificar a avaliação LCA, levando por isso a conclusões com algum grau de incerteza. Por esta razão, versões mais recentes do programa incluem um sistema LCA, o EcoCalculator, que avalia as principais componentes do edifício e compara-as com resultados de referência (<http://www.leed.net>).

No panorama nacional surgem duas ferramentas principais: o LiderA e o SBTool^{PT-H}. O programa **LiderA** surge em 2005 como uma ferramenta voluntária de certificação de edifícios sustentáveis e já certificou mais de 1000 edifícios no território nacional. O sistema, adaptado à realidade portuguesa, pretende apoiar o desenvolvimento de projetos sustentáveis, em todas as etapas do ciclo de vida, de maneira a promover o valor da sustentabilidade no mercado de construção. A avaliação é feita segundo uma classificação entre A e E, sendo o nível E referente às práticas existentes, e as classificações entre A e C consideradas positivas (<http://www.lidera.info>).

O **SBTool^{PT-H}** é a adaptação à realidade portuguesa de uma metodologia internacional SBTool (Sustainable Building Tool). O SBTool é um sistema internacional de avaliação da sustentabilidade de edifícios, tendo sido desenvolvido pela associação iiSBE (international initiative for the Sustainable Built Environment) aplicado em mais de 20 países, entre a Europa, a Ásia e a América. Esta ferramenta tem como objetivo apoiar os intervenientes na fase de projeto de edifício de habitação e fazer a avaliação e certificação da sustentabilidade de edifícios novos e renovados. Este sistema permite também

reconhecer as soluções que conduzem ao desenvolvimento de edifícios sustentáveis (Bragança e Mateus, 2009).

Em relação a outros programas, a metodologia SBTool^{PT}-H procurou simplificar a lista de indicadores, reduzindo-os para 25 parâmetros, distribuídos por 9 categorias, referentes às três principais dimensões da sustentabilidade: ambiental, social e económica. A integração da dimensão económica e principalmente da dimensão social é outra das diferenças deste sistema para outros similares, que muitas vezes reduzem a análise à dimensão ambiental. O SBTool procura distinguir o tipo de edifício na sua avaliação e por isso desenvolve diferentes metodologias para cada um. É por esta razão que em Portugal apenas está disponível o sistema para a habitação, sendo que diferentes tipos de edifícios estão a ser preparados.

Apesar do desenvolvimento e avanço constante destes programas, a implementação de uma avaliação e certificação sustentável tem ainda problemas a serem resolvidos, como a complexidade dos edifícios, a multidisciplinaridade da análise do ciclo de vida, a elevada quantidade de materiais e sistemas existentes no mercado ou o prolongamento da esperança de vida dos edifícios. A generalização destes sistemas tem ainda obstáculos resultantes das diferenças políticas, tecnológicas, culturais e socioeconómicas existentes entre países (Bragança e Mateus, 2011).

2.6. Principais características dos materiais

A competição entre as indústrias de betão e aço pela conquista do mercado da construção, ao longo da história, é amplamente reconhecida. Os dois materiais, assumindo funções estruturais, dominam praticamente todo património da construção, podendo ser comparado apenas à construção em pedra, principalmente até ao século passado (Castro, 2008). As características estruturais e disponibilidade das matérias são as razões mais comuns para a escolha destes materiais, sendo que existem outras, também facilmente identificadas, que adequam a escolha entre um ou outro material.

Numa avaliação simples e intuitiva, podemos enumerar algumas características de cada um dos materiais, que podem ser interpretadas como vantajosas para uma construção sustentável. Assim, o betão surge como um material que pode assumir uma grande variedade de formas, durável e resistente ao fogo. No entanto, o seu comportamento mecânico não é o mais completo, pois apenas apresenta uma boa resistência à compressão. Por seu lado, o aço apresenta uma alta resistência em relação ao seu peso e praticamente semelhante à tração e compressão, contando também com a sua ductilidade

e precisão de configuração da estrutura. Como ponto mais fraco, podemos afirmar a fraca resistência ao fogo, exigindo sistemas de proteção especiais, e o elevado custo de produção. No entanto, numa interpretação mais detalhada de cada material, podemos observar outras qualidades sustentáveis intrínsecas a cada um deles.

2.6.1. Betão

O betão é um dos materiais mais utilizados em todo o mundo devido às suas características gerais: é um material universal, versátil e durável. No geral, os edifícios em betão fornecem um ambiente interior seguro, saudável e confortável. O seu potencial estético, que tanto pode imitar pedra como criar formas modernas, aliado à sua capacidade técnica, permite transformar o betão no material estrutural por excelência. É por estas razões que é o segundo material mais consumido no mundo, logo depois da água (European Concrete Platform, 2009).

As primeiras utilizações do betão, ou de um material com características semelhantes, chamado betão romano, são associadas a uma argamassa de união entre pedras, pois como sistema contínuo, com características monolíticas, era um material bastante débil à tração (Castro, 2008).

O betão é um produto artificial e compósito, constituído por água, areias grossas (godo ou brita), areias finas e um ligante hidráulico (cimento). Atualmente são adicionados outros elementos em pequenas quantidades, que provocam alterações favoráveis à sua função, como adjuvantes (elementos que alteram o comportamento do material, como aceleradores ou retardadores de presa, entre outros) e adições (puzolanas, corantes, etc.) (Castro, 2008). O betão, como material individual, apresenta uma boa resistência à compressão mas reduzida resistência à tração, o que condiciona as suas capacidades estruturais. Por essa razão, utiliza-se normalmente uma solução mista, ao acrescentar elementos de aço, as armaduras, que permitem melhorar o comportamento à tração do conjunto, obtendo desta forma o betão armado (European Concrete Platform, 2009).

Pela sua constituição inicial semi-líquida, o betão oferece uma maior liberdade plástica ao sistema mas, pelo mesmo motivo, obriga a uma estrutura secundária, a cofragem, que serve para dar a forma desejada. Esta estrutura, normalmente em madeira, vem acrescentar um maior investimento ao valor do conjunto. Por causa deste processo, também a necessidade de secagem aumenta a duração dos trabalhos.

Existem atualmente vários tipos de betão, que variam principalmente pela sua composição ou método de produção. Assim, o betão comum, cuja massa volúmica se situa entre o 2000 e 2600kg/m³, é o material mais comum de produção tradicional. O betão

pesado, cuja massa volúmica ultrapassa os 2600kg/m^3 , é utilizado para espaços com necessidade de proteção a radiação e, para isso, os agregados comuns são substituídos por agregados pesados, como elementos de sucata. O betão leve surge como reforço estrutural e apresenta uma massa volúmica entre os 800 e 2000kg/m^3 . Estas variantes do betão são assim associados a alterações de composição do betão tradicional (NPEN206-1:2005).

Alterando o método de produção, podemos encontrar o betão fresco, que é misturado e compactado na obra, permitindo maior viscosidade e consequentemente maior habilidade para trabalhar a forma. A construção *in situ*, com a execução dos elementos estruturais nos próprios locais de construção, permite aos projetistas darem atenção aos detalhes mas também pode influenciar a qualidade do produto final. O betão pré-fabricado, produzido em modelos standard, permite um maior controlo de desperdícios e maior rigor no desenho. A pré-fabricação de elementos de betão armado permite acrescentar à construção a eficiência dos métodos industrializados, os sistemas de controlo de qualidade que as condições industriais permitem e a redução drástica do tempo e custo de execução. Existe ainda o betão projetado, que implica uma tecnologia mais avançada e por isso é utilizado em situações específicas, como construção de túneis (Cement Concrete & Aggregates Austrália, 2010).

O betão apresenta-se como um material versátil que pode trazer benefícios sustentáveis, em termos económicos, com a sua massa térmica, durabilidade, resistência ao fogo, comportamento acústico, adaptabilidade e capacidade de reciclagem. “O betão é um dos materiais de construção mais sustentáveis quando é considerada a energia consumida na sua produção e as suas propriedades inerentes de uso” (European Concrete Platform, 2009 – p.6).

A *Portland Cement Association and Environmental Council of Concrete Organization* e a *Cement Concrete & Aggregates Austrália* assumem várias razões para considerar o betão um material sustentável. A eficiência de recursos é um aspecto a considerar nesta análise, pois a componente mais utilizada no cimento é o calcário, que é o mineral mais abundante na terra. É importante ainda referir que o betão pode ser feito com cinzas volantes, escórias de cimento e sílica de fumo, todos produtos residuais provenientes de instalações eléctricas, siderurgias e outras indústrias, ou seja, resultantes da reciclagem ou reutilização. Outra das considerações sustentáveis sobre o betão prende-se com a pouca energia que a produção deste material exige, principalmente quando é comparada com a fabricação do aço. A minimização de desperdícios, ao produzir apenas a quantidade necessária para cada projeto, e a possibilidade de reutilizar os destroços de demolições em

pavimentos ou enchimentos, contribuem também para o seu comportamento sustentável (Cement Concrete & Aggregates Austrália, 2010).

É de referir também a reação das estruturas de betão ao tempo, pois em situações normais não provoca alterações na sua composição, pelo que a expectativa de vida dos edifícios aumenta com a utilização deste material. Ao ser resistente ao fogo, o betão não arde e não emite fumos nem gases tóxicos, por isso não necessita de medidas adicionais para a proteção dos seus elementos.

A eficiência energética associada à massa térmica do betão é reconhecida como uma das características mais relevantes no comportamento deste material. Ao absorver e reter o calor, o betão reduz o consumo energético e promove o conforto, sem ser necessário recorrer exclusivamente a equipamentos secundários. Também a refletividade, que minimiza os efeitos de ilha de calor, e a permeabilização das superfícies, que evita o desequilíbrio do ecossistema natural, são vantagens da utilização do betão (Cement Concrete & Aggregates Austrália, 2010).

Em relação ao seu comportamento acústico, o betão apresenta-se como uma boa barreira ao som pela sua massa. Para vãos normais, a alta densidade do betão permite o amortecimento natural e uma consequente baixa vibração. Desta forma, pode dizer-se que o betão tem um bom comportamento acústico e de vibração.

Existe ainda a possibilidade de reutilização de edifícios, podendo ser adaptados com alguma facilidade. A reutilização permite poupar recursos naturais (materiais, energia e água) bem como reduzir resíduos sólidos e emissões poluentes. Muitas vezes é também possível aumentar a estrutura, como foi feito, por exemplo, na Condor Tower, em Perth (Cement Concrete & Aggregates Austrália, 2010). A durabilidade do betão é a característica chave para a sua reutilização.



Figure 8 - Esquema da operação de reutilização do edifício Condor Tower, em Perth, através do aumento da estrutura. Fotografia do resultado final.

Estes são assim os argumentos mais relevantes para a defesa do betão como material sustentável, pelo que em alguns casos são características difíceis de quantificar para permitir uma comparação realista com outro material estrutural.

Nesta análise, é importante perceber o processo em que se inserem as avaliações de ciclo de vida dos elementos em betão, de maneira a esclarecer as etapas do ciclo de vida que envolvem o seu processo de fabricação. Desta forma, é essencial distinguir os quatro principais sistemas que envolvem as estruturas em betão: a produção de betão, a produção da cofragem, a produção dos reforços (armaduras) e a construção da própria estrutura. No entanto, é importante salientar que estes sistemas envolvem também outros sistemas, como a produção do betão, que pressupõe a produção de cimento e a produção de agregados, ou a construção, que envolve a colocação dos vários elementos, como a cofragem, as armaduras e o betão e a remoção da cofragem. Isto significa que a análise da construção de uma estrutura em betão armado, implica a consideração de todas as operações necessárias para chegar ao produto final (Johnson, 2006).

É apresentado o esquema geral da construção da estrutura em betão armado, bem como os sistemas diretamente envolvidos no processo e as entradas e saídas envolvidas. Assim, em todos os processos é contabilizada a utilização de energia e recursos e a produção de desperdícios e emissões, os grandes contribuintes dos impactos ambientais resultantes de todos os processos.

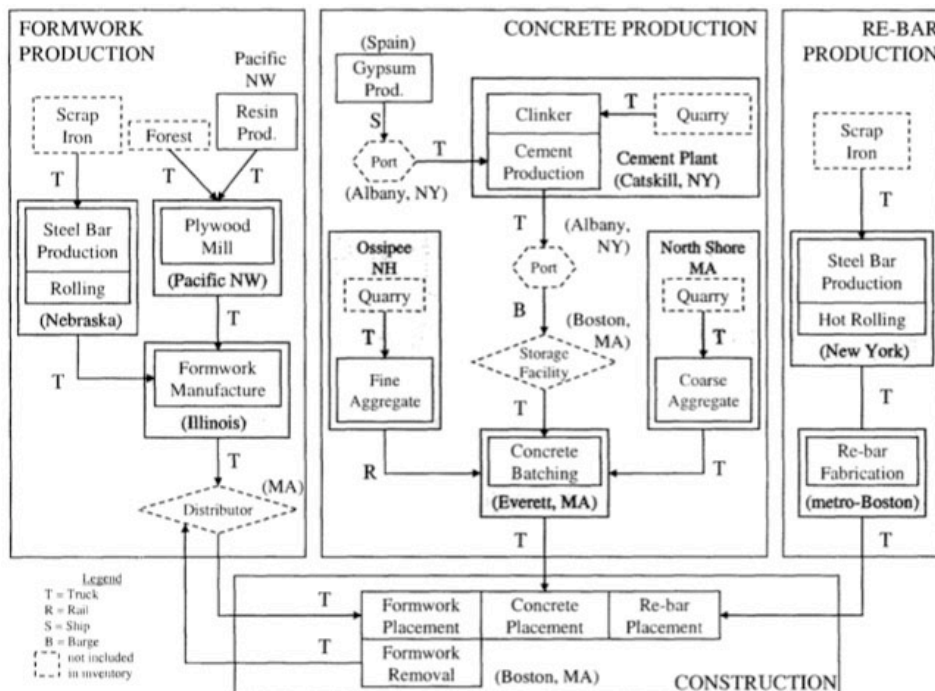


Figure 9 - Diagrama dos processos de produção da estrutura de betão (Johnson, 2006)

2.6.2. Aço

O aço é um produto muito utilizado na indústria da construção, principalmente pela versatilidade que apresenta para desempenhar várias funções construtivas. A estrutura surge como uma das aplicações mais utilizadas, pelas características que pode apresentar, no entanto pode também ser utilizado em subestruturas, fachadas, divisões interiores, sistemas modelares e equipamentos. Para sistemas estruturais, atualmente o aço é utilizado como aço macio laminado em perfis e chapas, na execução de estruturas metálicas, mas também em armaduras de reforço das estruturas de betão armado ou em cabos de alta resistência de pré-esforço. Existem também soluções em que se associam elementos de aço laminado com elementos de betão, a que se designam estruturas mistas.

O aço surge como material estrutural principalmente associado à Revolução Industrial, ponto de partida para o seu desenvolvimento a partir do ferro fundido (Castro, 2008). O aço é uma liga metálica composta principalmente por ferro (92-96%) e carbono (1-2%), apresentando por isso a maior parte das vantagens do ferro. Uma das suas características mais relevantes é o seu comportamento mecânico, tendo uma boa resistência à tração e à compressão. A resistência ao fogo das estruturas de aço é um dos seus pontos fracos pois a exposição a temperaturas progressivamente crescentes provoca uma redução significativa na sua capacidade resistente e na sua rigidez, que pode levar ao colapso da estrutura, quando atingida a temperatura crítica do material. Para controlar esta característica é possível proteger os elementos estruturais com sistemas corta-fogo, desde placas ou pinturas corta-fogo ou com o próprio betão. Estes sistemas podem também servir para a proteção contra a corrosão, facto resultante da exposição ao ambiente e humidade, que se traduz num aumento do volume do elemento e que provoca uma redução da capacidade resistente.

Devido ao seu comportamento mecânico, é possível produzir elementos estruturais relativamente leves, apesar do seu elevado peso volúmico. O material mais próximo do centro da viga está submetido a esforços menores que o material à superfície e é, de certo modo, desperdiçado, justificando assim o desenho dos elementos em I, T ou tubulares. Numa estrutura metálica, os elementos componentes podem ser constituídos apenas de aço, como as vigas, pilares, asnas, e as mais complexas treliças, mas as lajes normalmente funcionam em conjunto com o betão (Castro, 2008).

O método de pré-fabricação é dominante na produção de elementos metálicos, quer estruturais ou de outra função, pelo que as ligações entre os diferentes elementos assumem grande importância, podendo ser realizadas por soldadura, rebitagem ou aparafusamento. Estas características de produção permitem uma contribuição favorável do

aço para a construção sustentável. Uma delas é a possibilidade de erguer uma estrutura em aço num processo muito rápido e de alta qualidade, reduzindo os custos e utilização de recursos na fase de construção. O controlo industrial permite uma maior garantia de qualidade, diminuição de desperdícios (através de controlo digital de todo o processo) e redução dos impactos ambientais no local da obra. O processo de montagem associado à estrutura metálica permite também a sua alteração num período posterior à construção, acrescentando uma nova estrutura em aço por cima da existente, ainda que possa exigir alterações nas fundações iniciais. Outra característica é a possibilidade de reutilização dos seus elementos, através da utilização de juntas aparafusadas e não soldadas. Assim, o potencial de desconstrução, como desmontagem, promove a reutilização dos elementos, reduzindo desperdícios e emissões associadas a uma nova produção.

Além desta possibilidade de reutilização, o aço é 100% reciclável. Esgotada a vida útil de uma estrutura, os seus elementos podem ser recuperados (desmontados ou selecionados magneticamente em entulho de demolições) e regressar aos fornos sob a forma de sucata, transformando-se em novo aço, sem qualquer perda de qualidade. Este processo é designado por produção em forno de arco eléctrico. Atualmente, os elementos em aço têm uma taxa de recuperação de 99%, sendo que em média 11% são reutilizados com a mesma função estrutural e 88% são usados para reciclagem (Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012). Naturalmente, este processo repete o consumo de energia e a produção de emissões de uma primeira produção de aço, mas no entanto permite reduzir a utilização de novos recursos. Ainda no que diz respeito à reciclagem, os subprodutos do ferro e aço, como a escória de alto forno, podem ser usados em benefícios da indústria da construção, como agregados reciclados na produção de cimento.

O potencial de desenho arquitectónico associado à estrutura metálica é reconhecido ao longo da história da arquitetura, principalmente associado a edifícios em altura, como arranha-céus, ou com grande extensão de área interior livre, como edifícios industriais ou pavilhões multifuncionais (Castro, 2008). A flexibilidade dos espaços interiores é uma das suas principais características, através da utilização de elementos estruturais esbeltos e pela sua capacidade de atingir grandes vãos. A possibilidade de exploração de uma arquitetura modular, apoiada no processo de pré-fabricação, estará sempre associada à redução de custos e otimização do trabalho, ideias associadas integralmente à construção sustentável.

Na análise do ciclo de vida de uma estrutura metálica, é importante entender o processo na sua globalidade, isto é, assumindo todos os processos secundários intervenientes. Para todos os processos é contabilizada a utilização de energia e recursos e

a produção de desperdícios e emissões, grandes responsáveis pelos impactos ambientais resultantes de todos os processos (Johnson, 2006).

O sistema de produção da estrutura metálica envolve a fabricação do aço, a produção dos elementos em perfil e conexões, bem como a manufatura de produto de proteção contra o fogo. Também neste processo se encontra a fabricação dos produtos de betão armado, o que repete uma parte do sistema da estrutura em betão, analisado anteriormente (Johnson, 2006).

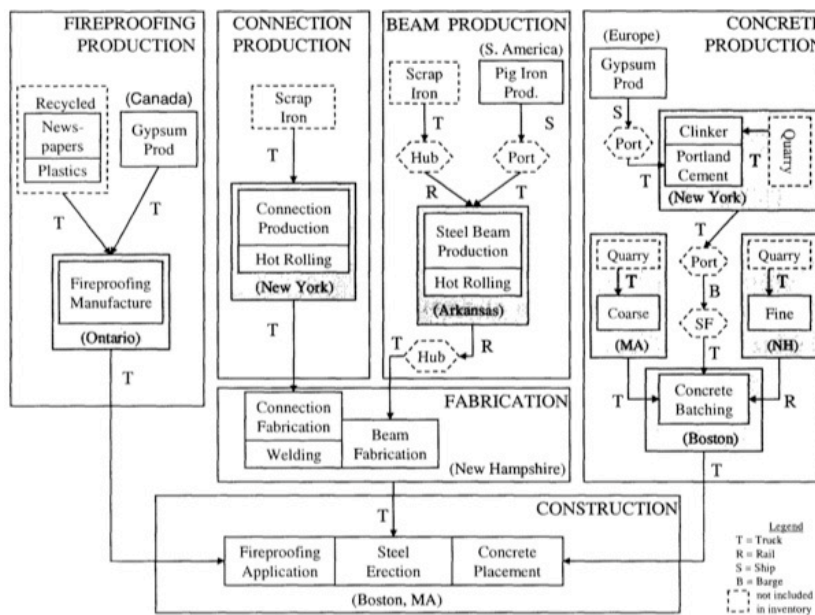


Figure 10 - Diagrama dos processos de produção da estrutura em aço (Johnson, 2006)

2.7. Apresentação de estudos de comparação sustentável entre materiais

A comparação entre o betão e o aço é um tema recorrente na investigação relacionada com materiais, tanto em engenharia como em arquitetura, adaptado à realidade de cada área profissional. Recentemente intensificaram-se os estudos com o objetivo de comparar os dois materiais numa perspectiva sustentável, acompanhando a evolução imposta pela sociedade. Assim, neste estudo foram consultados vários trabalhos nesta área, que procuraram condições para eleger o material mais sustentável, entre o betão e o aço. Ainda que o objetivo principal seja sempre o mesmo, a metodologia utilizada é distinta e, por essa razão, os resultados não são se repetem.

As principais diferenças entre as abordagens a este tema prendem-se com a definição de parâmetros a considerar na comparação dos dois materiais, bem como o limite do estudo, com a definição das fases de ciclo de vida envolvidas. Em todos eles a opção de

analisar elementos estruturais, isolados ou em sistema, é unânime, com a convicção de que a comparação entre a mesma quantidade de material não tem sentido neste contexto.

Desta forma, são apresentados resumidamente e por ordem cronológica, alguns estudos selecionados da bibliografia, que abrangem as questões pertinentes e apresentam resultados distintos. A seleção dos trabalhos foi feita durante a pesquisa bibliográfica do tema e teve como principal objetivo abranger metodologias distintas entre si, na perspectiva de se conseguir identificar os efeitos das escolhas que são feitas. A apresentação destes trabalhos não implica que não haja outras investigações semelhantes e com tanto ou mais interesse para o presente estudo, no entanto foi necessário restringir o panorama a ser considerado aos dez estudos seguintes.

ESTUDO I – *Best Practices Guide. Materials Choices for Sustainable Design* (Kerman, 2001)

Embodied Energy Analysis		
	Steel Framed Structure	Concrete Framed Structure
Total initial structural embodied energy	5,858 GJ	5,860 GJ
Structural embodied energy per m²	1.27 GJ	1.27 GJ
Total building initial embodied energy	22,914 GJ	22,768 GJ
Total building initial embodied energy per m²	4.96 GJ	4.93 GJ

Figure 11 - Quadro dos resultados da comparação entre a estrutura de betão e de aço (Kerman, 2001).

Integrado num guia de orientação para a escolha dos materiais mais adequados, na perspectiva sustentável, foi feita uma análise comparativa da energia incorporada em duas estruturas diferentes para o mesmo edifício de escritórios, de 4600 m² e com quatro pisos. Com a utilização da metodologia ATHENA, foi analisada uma estrutura em betão e outra em aço, em que as fundações e o piso da cave se mantiveram em betão nas duas estruturas. Os resultados mostram que existem poucas diferenças entre os dois sistemas, no que diz respeito à energia incorporada associada. Esta análise permitiu perceber que em ambos os casos a energia incorporada da estrutura é aproximadamente 25% do total da energia incorporada do edifício. É ainda de salientar que a energia incorporada dos elementos de betão pertencentes à estrutura metálica representa a maior parte da energia incorporada da estrutura.

Por fim, este estudo indica que ao longo da vida de um edifício, os elementos estruturais, que normalmente não são substituídos, tornam-se pouco relevantes no conjunto

de energia incorporada do edifício. No final dos 50 anos, ambas as estruturas representam apenas 2% do total de energia incorporada do ciclo de vida do edifício.

ESTUDO II – Considering Sustainability in the Selection of Structural Systems. (Buckley, Halsall, Vollering e Webber, 2002)

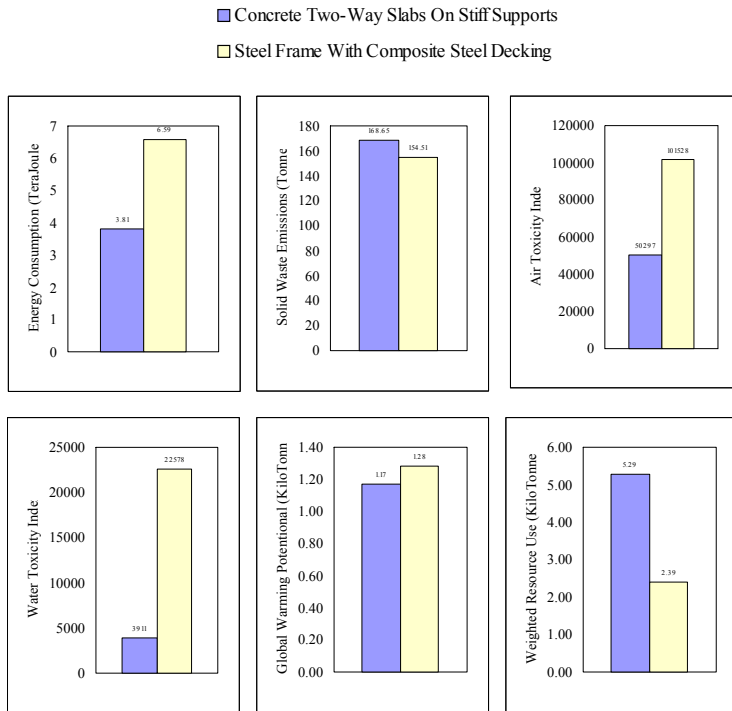


Figure 12 - Gráficos dos resultados da comparação entre a estrutura de aço e de betão nos vários indicadores considerados. (Buckley, Halsall, Vollering e Webber, 2002)

Este estudo procurou identificar a melhor solução entre a estrutura em betão armado e em aço para um edifício da Universidade de Queens, no Canadá, com três pisos e 2300m², tendo em consideração os impactos ambientais envolvidos na extração de recursos, na fabricação e na instalação dos sistemas estruturais. Utilizando a ferramenta ATHENA, os indicadores considerados foram a utilização de recursos, o potencial de aquecimento global, o índice de toxicidade do ar, o índice de toxicidade da água, os desperdícios sólidos e a energia incorporada.

As principais conclusões deste estudo indicam que a estrutura em betão tem menos impacto no aquecimento global, nos índices de toxicidade, nos desperdícios sólidos e no consumo de energia, tendo apenas pior resultado no uso de recursos e produção de desperdícios sólidos. Como conclusão principal, este estudo indica que a estrutura de betão tem melhor desempenho ambiental do que a estrutura metálica.

Este resultado é inesperado, pois contraria a maior parte das investigações sobre este tema, e apenas pode ser explicado por questões específicas relativas ao desenho deste edifício. Para tentar perceber se a metodologia utilizada teria algum erro implícito, esta investigação analisou nas mesmas condições um edifício de um piso, com um desenho distinto. Os resultados indicaram que a estrutura metálica teria um melhor desempenho ambiental, em consonância com a maior parte dos estudos realizados nesta área. Assim, podemos concluir que os impactos ambientais variam significativamente com a escolha do tipo de estrutura, e que o mais pequeno detalhe pode fazer alterar todo o comportamento ambiental.

ESTUDO III - *How Sustainable is Concrete?* (Godfrey e Struble, 2004)

Impact	Reinforced concrete	Steel
Resource use (kg)	48.85	18.69
Warming potential (kg equivalent CO ₂)	9.97	8.95
Water pollution index	0.34	0.98
Air pollution index	2.01	2.46
Solid waste (kg)	1.87	1.80
Energy (MJ)	140.18	229.69

Figure 13 - Quadro do desempenho ambiental das vigas de betão armado e de aço (Godfrey e Struble, 2004).

Este estudo teve como objetivo encontrar condições para reconhecer o betão como material sustentável. Para tal, foi feita a comparação dos impactos ambientais de uma viga em betão armado e uma viga em aço, ambas com a mesma função estrutural. Utilizando a ferramenta ATHENA e considerando a extração de materiais, a fabricação e o transporte, foram calculados os impactos ambientais nos seguintes indicadores: utilização de recursos, potencial de aquecimento global, potencial de toxicidade da água, potencial da toxicidade do ar, desperdícios sólidos e energia utilizada.

A análise feita entre os resultados obtidos nos vários indicadores mostra um melhor desempenho ambiental por parte da estrutura em betão armado, numa avaliação geral. Individualmente, a estrutura em betão tem melhor comportamento na energia consumida, utilizando quase metade da quantidade utilizada pela estrutura em aço, menor impacto na toxicidade do ar e da água. No entanto, a estrutura em aço tem um menor potencial de aquecimento global, utiliza menos recursos e produz menos desperdícios.

A conclusão deste estudo acaba por introduzir o factor de importância relativa de cada indicador, ao considerar que a estrutura em betão tem um melhor desempenho ambiental do que a estrutura em aço, ainda que ambas apresentem melhor comportamento

em três dos seis indicadores. Assim, ao atribuir o melhor desempenho à estrutura de betão, este estudo está a sugerir que os indicadores de potencial toxicidade da água e do ar, bem como a energia consumida, são factores mais relevantes do que o potencial de aquecimento global, a utilização de recursos e a produção de desperdícios sólidos.

ESTUDO IV – Avaliação Ambiental Comparativa de Estruturas Metálicas e de Estruturas de Betão Armado. (Peyroteo, Carvalho e Jalali, 2005).

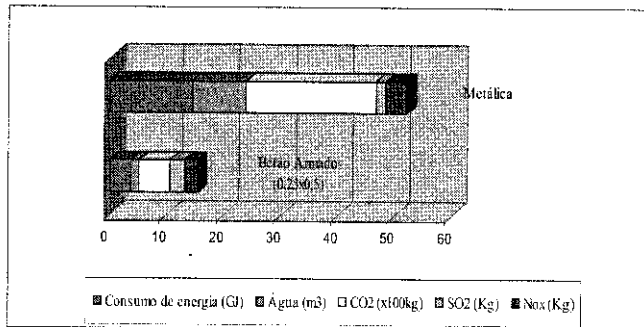


Figure 14 - Representação gráfica dos resultados obtidos entre a comparação dos elementos estruturais de betão e de aço (Peyroteo, Carvalho e Jalali, 2005).

Através da aplicação da metodologia de avaliação do ciclo de vida, este estudo procurou avaliar os impactos ambientais e económicos provocados pela produção dos materiais necessários na execução de uma estrutura em betão armado e em elementos metálicos. Utilizando um pórtico de quatro pilares e uma viga de três vãos, o estudo considerou as fases de extração de matérias-primas e fabricação dos elementos, não incluindo assim as fases de manutenção, utilização e fim de vida. Os indicadores ambientais considerados foram o consumo de energia, o consumo de água, as emissões de dióxido de carbono, de dióxido de enxofre e de óxido de enxofre. Como indicador económico foi considerado o valor final de custo da estrutura.

Nesta análise, a estrutura metálica mostrou um pior desempenho em todos os indicadores, com exceção das emissões de dióxido de enxofre, concluindo que a estrutura em betão tem menores impactos ambientais e económicos.

Neste estudo foram também analisados os efeitos nos impactos de cada viga com a alteração das respectivas dimensões, mantendo a mesma função estrutural. Para a viga de betão armado, concluiu-se que quanto maior for a quantidade de aço menor são os impactos associados à viga, pois a secção do elemento é menor, o que implica menor quantidade de cimento, água, agregados e cofragens. Esta conclusão permite reforçar a ideia de que a análise dos impactos ambientais de uma estrutura depende de muitos factores, incluindo o seu dimensionamento. Outros factores como a escolha dos

indicadores, as bases de dados ou a localização geográfica específica podem alterar significativamente os resultados de uma análise deste género.

ESTUDO V - A Sustentabilidade do Aço e das Estruturas Metálicas. (Gervásio, 2006).

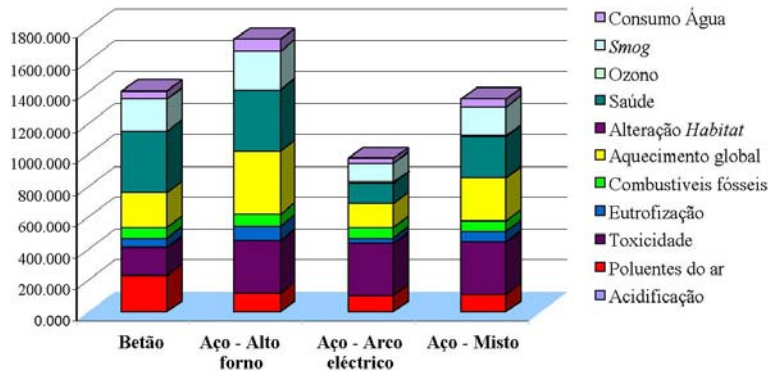


Figure 15 - Representação gráfica do desempenho ambiental das quadros vigas em estudo (Gervásio, 2006).

O estudo apresentado tem como objetivo principal comparar os impactos produzidos pelos dois processos tradicionais de produção de aço, a produção de alto forno (a partir de matérias-primas) e a produção em forno de arco eléctrico (a partir de sucata). A principal diferença entre os dois processos tem relação com a utilização de aço reciclado (25%-35% na produção de alto forno e 95% na produção em forno de arco eléctrico) e as respectivas consequências, como a diminuição de consumo de energia, de recursos e de emissões atmosféricas. Por estas razões, a produção em forno de arco eléctrico apresenta um melhor desempenho ambiental. Apesar disso, este método representa apenas 40% da produção atual.

De maneira a estudar os respectivos comportamentos ambientais consequentes do processo de fabricação foi feita uma análise comparativa entre duas soluções estruturais para um ponte: uma solução em betão pré-fabricado e outra mista, com vigas metálicas e laje em betão. Para as vigas metálicas foram apresentadas três possibilidades de utilização do tipo de aço: uma apenas com aço produzido em alto forno, outra apenas com aço produzido em forno de arco eléctrico e uma solução mista, com utilização de 50% de cada tipo de aço. Utilizando a ferramenta de análise de ciclo de vida BEES, foi considerado uma análise cradle-to-gate, baseada nos seguintes indicadores: consumo de água, efeito smog, destruição da camada de ozono, saúde, alteração do habitat, potencial de aquecimento global, utilização de combustíveis fósseis, potencial de eutrofização, potencial de toxicidade, produção de poluentes atmosféricos e potencial de acidificação.

A comparação entre as duas soluções estruturais, na relação da solução de betão com as três combinações possíveis, permite concluir que: a estrutura em aço de alto forno tem o pior desempenho, com mais 23% de impactos ambientais; a estrutura em aço produzido em forno de arco eléctrico tem o melhor desempenho, com menos 31% do que a estrutura de betão; e por fim, a estrutura com utilização mista dos dois tipos de aço apresenta um desempenho muito semelhante ao da estrutura em aço, com menos 4% de impactos. Estes indicadores mostram com clareza a vantagem na utilização de aço produzido à base de aço reciclado.

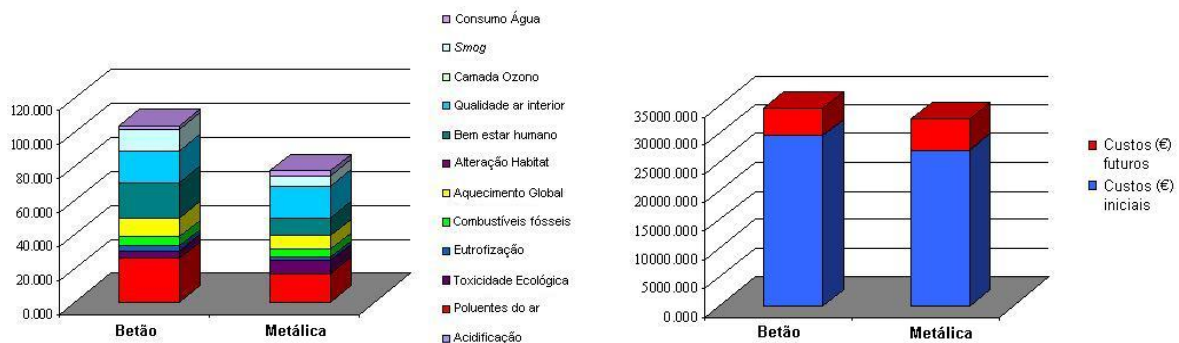


Figure 16 - Representação gráfica do desempenho ambiental (esquerda) e económico (direita) da estrutura em betão e em aço (Gervásio, 2006).

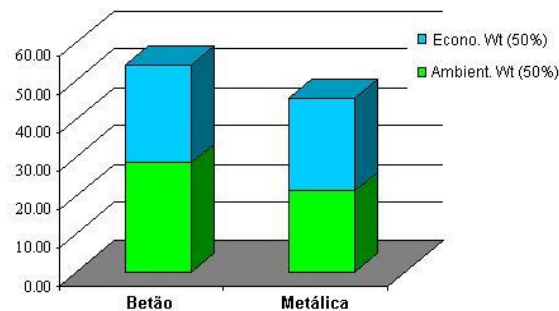


Figure 17 - Representação gráfica do desempenho global da estrutura de betão e de aço (Gervásio, 2006).

Ainda sobre a sustentabilidade do aço, este estudo procurou também fazer a comparação entre duas soluções estruturais para um edifício de habitação: uma estrutura de pilares e lajes em betão e outra mista, com laje mista e pilares metálicos. Para além da comparação dos impactos ambientais de cada estrutura, este estudo alargou o âmbito ao desempenho económico das estruturas. Para o desempenho ambiental foram utilizados os mesmos critérios da comparação entre as pontes, acrescentando o indicador da qualidade do ar interior, e para o desempenho económico foram considerados os custos iniciais e os custos de manutenção, com base numa expectativa de vida de 50 anos e uma taxa real de desconto de 3,9%.

Na análise dos gráficos apresentados no documento consultado, no indicador económico a estrutura de aço/betão tem um melhor desempenho, mas não muito

significativo. Nos indicadores ambientais, a estrutura em betão tem pior desempenho, com maior significado no efeito de smog, no bem estar humano e na emissão de poluentes. Assim, atribuindo a mesma importância relativa às duas dimensões sustentáveis, podemos afirmar que a estrutura mista de aço e betão tem um melhor comportamento, em comparação com a estrutura em betão armado.

ESTUDO VI – *Comparison of Environmental Impacts of Steel and Concrete as Buildings Materials using Life Cycle Assessment Method.* (Johnson, 2006).

	CO ₂ emissions	Energy Consumption	Resource Depletion
Steel	12.4 kg/SF	102.1 MJ/SF	2.8 Mg/SF
Concrete	16.4 kg/SF	102.5 MJ/SF	8.8 Mg/SF

Figure 18 - Quadro dos resultados do desempenho ambiental da estrutura de aço e de betão (Johnson, 2006).

Numa perspectiva geral, este estudo mostra que as estruturas de aço e betão têm impactos relativamente semelhantes nas três áreas definidas no âmbito do estudo: o consumo de energia, as emissões atmosféricas e o esgotamento de recursos. Ainda assim, através dos resultados brutos da análise, este estudo afirma que o aço tem um desempenho mais sustentável como material estrutural, tendo em consideração o ciclo de vida até à utilização do edifício. Tem um comportamento claramente melhor nas emissões atmosféricas (menos 25% que o betão) e no esgotamento de recursos (menos 68% que o betão). No que diz respeito ao consumo de energia, os dois materiais obtiveram resultados muito semelhantes, sendo que por essa razão este indicador não teve influência no resultado.

De qualquer maneira, os autores do estudo admitem que ao longo do trabalho foram sendo tomadas opções que podem ter afectado os resultados, bem como terem sido considerados dados com alguma incerteza, devido à complexidade que todo o processo envolve.

A análise foi feita utilizando os resultados brutos em cada indicador, não sendo feita qualquer ponderação do valor de cada um, o que é facilmente aceite a partir do momento em que o mesmo material se mostrou melhor nas três áreas, sendo aceitável que em conclusão se considere o aço como material mais sustentável. A questão da ponderação dos resultados seria colocada se o betão tivesse obtido um resultado melhor num dos indicadores, colocando-se o problema de qual deles seria mais importante na análise do desempenho sustentável de um material, ou se os três considerados seriam equivalentes. A atribuição de pesos aos indicadores considerados neste tipo de análise é um tema delicado e pode envolver questões subjetivas. Considerações geográficas por exemplo, podem

interferir neste balanço entre indicadores, pois numa área de matéria-prima abundante, o indicador de esgotamento de recursos pode não ter a mesma influência que o consumo de energia.

ESTUDO VII - Life-Cycle Assessment of Buildings Comparing Structural Steelwork with other Constructions Techniques. (Passer, Cresnik, Schulter e Maydl, 2007)

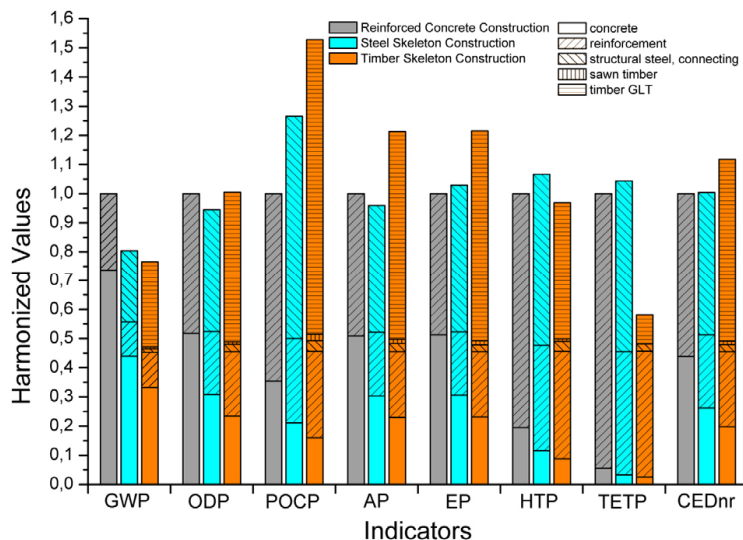


Figure 19 - Representação gráfica do desempenho da estrutura em betão armado, em aço e em madeira em cada indicador ambiental. (Passer, Cresnik, Schulter e Maydl, 2007)

Neste estudo é feita a comparação entre estruturas de betão armado, aço e madeira, através de processos de avaliação de ciclo de vida. Os resultados das três estruturas mostram-se muito próximos, evidenciando que nenhuma das estruturas sobressai positivamente em relação às outras, com base na análise LCA. Este resultado mostra que é necessário acrescentar as outras duas componentes sustentáveis a esta comparação, de maneira a aprofundar as diferenças entre a utilização dos materiais.

O estudo propõe também a consideração de uma nova dimensão no requisitos de construção: a sustentabilidade estrutural. Se anteriormente era necessário apenas garantir a estabilidade e funcionalidade do conjunto a longo prazo, atualmente é preciso ter em conta também a influência do edifício no meio em que se integra, exigindo-se que seja técnica, ecológica e economicamente otimizado.

A seleção dos indicadores utilizados para a avaliação do impacto do ciclo de vida é escolhido de acordo com ISO/DIS 21930 e os projetos do CENT TC 350 e os resultados da avaliação do impacto são calculados usando os dados do ECOINVENT v1.3. Devido ao objetivo explícito do estudo, apenas foi considerada a fase de construção, representando apenas o primeiro passo para uma avaliação completa do ciclo de vida. Os resultados do

LCI foram considerados em relação ao total de massa de construção em percentagem, sendo feita a comparação do material utilizado por m^2 de área.

Antes de mais, é necessário referir que o betão domina as três estruturas, pois está também presente nas estruturas de aço e madeira nas suas fundações e escadas de incêndio. Este factor põe em evidência duas das características fundamentais deste material: a durabilidade e a resistência ao fogo, sendo sempre uma opção mais válida para estes elementos estruturais.

Uma das conclusões deste estudo é a menor utilização de material por m^2 das estruturas em aço e madeira, devido às características mais esbeltas dos elementos utilizados, tendo em consideração o uso mais eficiente destes materiais. É por este motivo que são consideradas estruturas leves, em contraponto da estrutura em betão que, devido à sua massa, é uma estrutura considerada pesada.

Este estudo mostra que o desempenho ambiental de cada sistema estrutural é muito semelhante, apesar das diferentes classificações nos vários indicadores. Não há assim nenhuma técnica de construção específica que seja preferível apenas com base na análise LCA. Os aspectos como a concepção estrutural e a vida útil dos produtos de construção dependendo do uso e manutenção dos materiais utilizados não são considerados nesta avaliação de ciclo de vida. Este estudo põe ainda em evidência a necessidade de assumir a utilização das declarações de produtos ambientais, harmonizadas à escala da União Europeia.

ESTUDO VIII – Comparison of LCA on Steel and Concrete Construction Office Buildings: a Case Study. (Zhang, Su e Huang, 2007)

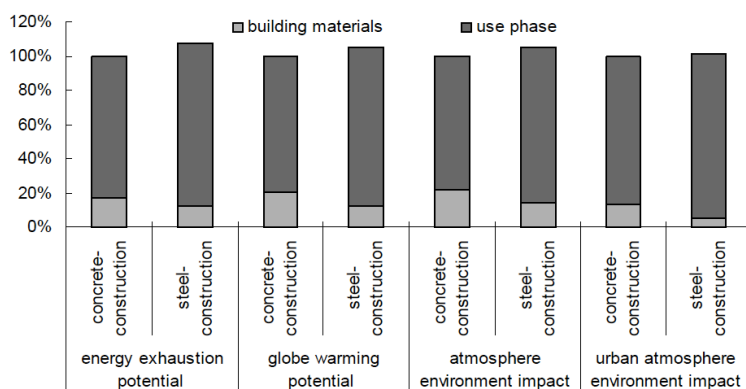


Figure 20 - Representação gráfica do desempenho ambiental da estrutura em betão e em aço. (Zhang, Su e Huang, 2007).

Neste trabalho é desenvolvida uma comparação entre modelos de inventário de ciclo de vida de edifícios de escritórios, sendo comparadas duas estruturas distintas: em aço e em betão. Os resultados mostram que a estrutura de aço tem melhor desempenho no

que diz respeito ao consumo de energia no ciclo de vida e às emissões atmosféricas. Verifica-se que no consumo de energia dos materiais de construção, a estrutura metálica tem menos 24,9% do que a estrutura de betão. No entanto, na fase de utilização e manutenção, no que diz respeito ao consumo de energia e emissões, é a estrutura em aço que apresenta resultados mais elevados. Desta forma, este estudo conclui que, considerando todo o ciclo de vida do edifício, a estrutura de betão apresenta um melhor desempenho do que a estrutura de aço.

ESTUDO IX – A Framing System's Environmental Impact depends on more than just the Choice of Materials. (Weisenberer, 2010)

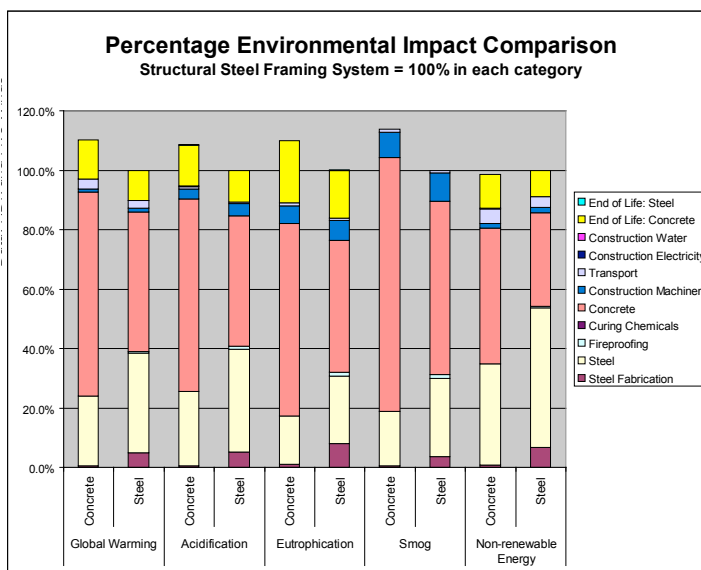


Figure 21 - Representação gráfica do desempenho ambiental da estrutura em betão e em aço. (Weisenberer, 2010)

Este artigo descreve um estudo sobre o material mais amigo do ambiente, fazendo a comparação da estrutura de dois edifícios existentes, com funções semelhantes. Como estruturas distintas, os impactos foram calculados por metro quadrado de área, de maneira a relacionar as duas estruturas. Foi utilizada a base de dados GaBi 4 LCI, nas fases de produção, construção e fim de vida, excluindo assim utilização e manutenção. Os indicadores considerados foram: aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, potencial de smog e energia incorporada não renovável.

Em todas as categorias, com exceção da energia incorporada não renovável, a estrutura em aço obteve melhores resultados do que a estrutura de betão, com valores que variam entre 8% e 14%. Na categoria sobre a energia utilizada, a diferença é de apenas

1%. Estes números mostram resultados muito semelhantes entre as duas estruturas, sendo difícil eleger qual a que apresenta melhor desempenho ambiental.

O maior contributo para os impactos em todas as categorias foi a produção de betão, seguido da produção de aço. Esta condição pode ser a justificação para os resultados próximos obtidos, pelo facto de qualquer uma das estruturas apresentar grandes quantidades do outro material. A estrutura de betão apresenta 6% de aço para 94% de betão, sendo que a estrutura metálica apresenta 10% de aço e 90% de betão. Com base nestes números, é possível concluir que, apesar de se apresentarem como estruturas significativamente diferentes, na realidade os dois sistemas são muito semelhantes, no que diz respeito à sua composição e consequentes impactos ambientais. No entanto, no que diz respeito ao seu desenho, continuam a ser estruturas com características muito distintas.

Por fim, este artigo põe em evidência, na conclusão do estudo apresentado, que um factor tão importante como a seleção dos materiais é a otimização do desenho da estrutura, promovendo o melhor uso do material, de maneira a diminuir os impactos ambientais mas também económicos e sociais.

ESTUDO X - *Eco Efficiency of Structural Frames for Low Rise Office Buildings*. (Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012)

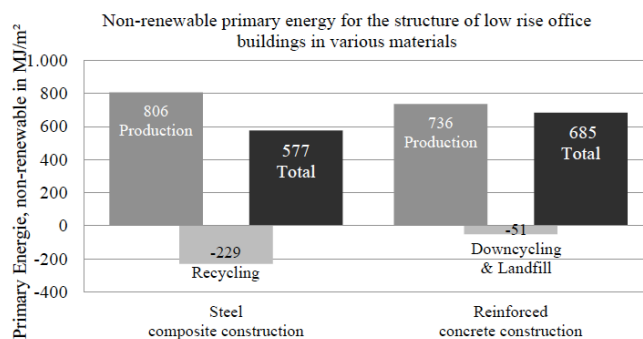


Figure 22 - Representação gráfica do desempenho ambiental no indicador de utilização de energia não renovável na estrutura em aço e em betão (Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012)

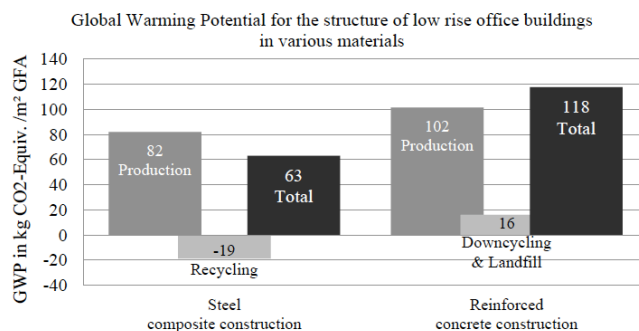


Figure 23 - Representação gráfica do desempenho ambiental no indicador de utilização de energia não renovável na estrutura em aço e em betão (Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012)

O estudo, apresentado na publicação “*Concepts and Methods for Steel Intensive Building Projects*” tem o objetivo de perceber os impactos ambientais de diferentes sistemas construtivos para edifícios de escritórios com três pisos. Para tal, o estudo propõe-se analisar dois sistemas estruturais distintos, um em aço e outro em betão, procurando determinar o desempenho ambiental dos produtos de construção. As duas estruturas são projetadas para uma área de 431,50 m², tendo em consideração as mesmas condições funcionais e estruturais, como a flexibilidade ou a geometria mínima necessária para cada elemento. Os indicadores de impactos ambientais considerados foram: energia primária não renovável, potencial de aquecimento global e quantidade de material, relacionados com a fase cradle-to-gate e o fim de vida (correspondentes ao módulo A1, A2, A3 e D da figura 3, capítulo 2.2.3).

Como conclusão principal, este estudo indica que o aço apresenta melhores resultados em todos os indicadores apresentados. O cenário de fim de vida dos materiais apresenta um papel importante na avaliação do desempenho ambiental dos produtos, pois os valores recuperados são creditados nos impactos ambientais iniciais. Este factor permite que, no indicador de energia primária não renovável, o betão tenha melhor desempenho quando é apenas considerada a fase de produção, mas é ultrapassado pelo aço quando considerado o fim de vida. No caso do potencial de aquecimento global, ao considerar esta fase, o comportamento do betão é ainda mais prejudicado, ao aumentarem os impactos ambientais associados. Quando comparadas as quantidades de material, em que o cenário de fim de vida não é considerado, o aço apresenta melhor desempenho, ao contabilizar quase um terço da quantidade de material da estrutura de betão.

Os estudos apresentados serviram para pôr em evidência vários factores relevantes para a comparação de estruturas de betão e aço, retirando valor aos resultados isoladamente. No capítulo 4, após o desenvolvimento do presente estudo, as principais características de cada um destes estudos foram recuperadas, sintetizadas e analisadas em conjunto.

3. CASO DE ESTUDO: COMPARAÇÃO ENTRE DUAS SOLUÇÕES ESTRUTURAIS

3.1. Importância da Estrutura

Dos vários elementos que constituem um edifício, a estrutura tem um papel muito relevante, não só pela sua função essencial de esqueleto do conjunto, mas também pela sua influência no desempenho global do edifício. Para entender a sua importância, é interessante perceber a quantidade de matéria que a estrutura normalmente representa, sendo que alguns estudos indicam que a sua massa representa 80% do conjunto (Buckley, Halsall, Vollering e Webber, 2002).

No que diz respeito ao desempenho económico, a estrutura pode representar 20% do custo total de investimento do conjunto (Buckley, Halsall, Vollering e Webber, 2002). Indirectamente, a escolha da estrutura pode também interferir no custo de utilização do edifício, não só pela necessidade de manutenção, que em casos normais não é muito significativa, mas principalmente pela influência que pode ter no desempenho geral do edifício, como por exemplo no comportamento térmico.

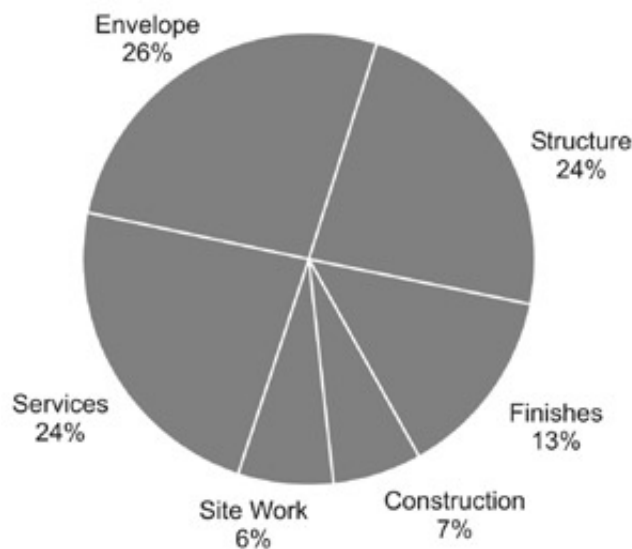


Figure 24 - Representação gráfica da energia incorporada inicial distribuída pelos vários processos construtivos (fonte: <http://www.canadianarchitect.com>)

Sobre o desempenho ambiental, a estrutura tem um impacto significativo no conjunto, não só por representar uma parte da massa total, mas também pelo tipo de material e equipamentos que envolve na sua produção e construção. Alguns estudos indicam que pode representar cerca de 24% da energia incorporada inicial do edifício, muito

próximo do que representa o sistema de encerramento (fachadas) ou os serviços/equipamentos (<http://www.canadianarchitect.com>).

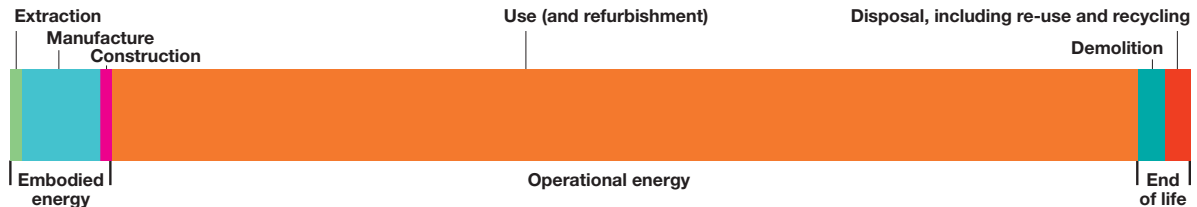


Figure 25 - Diagrama do consumo de energia de um edifício de escritórios numa expectativa de vida de 60 anos (fonte: <http://www.corusconstruction.com>)

Ainda assim, é importante referir que muitos estudos, baseados em análises LCA, referem que esta energia é normalmente menor do que 10% da energia total de utilização (incluindo aquecimento, arrefecimento, iluminação, entre outros), numa perspectiva de vida de 60 anos (<http://www.corusconstruction.com>). Aumentando a esperança de vida do edifício, o valor de energia consumida na fase construção fica ainda mais diluído. Podemos concluir assim que o consumo de energia mais significativo acontece durante a utilização do edifício, onde o impacto da estrutura é menos significativo, mas onde algumas opções tomadas na construção, como por exemplo o tipo de estrutura utilizada, continuam a ter grandes implicações.

Estes indicadores são confirmado no estudo feito pela Universidade da Califórnia (Kendall, 2010), que procurou comparar a análise LCA de uma habitação standard e de uma habitação eficiente energeticamente, isto é, com as características de desenho e equipamento definidas no mercado atual. Uma das principais conclusões deste estudo é a grande diferença entre o consumo de energia entre a fase fabricação e construção e a fase de manutenção e utilização. Sendo que naturalmente são fases que apresentam um tempo de vida muito diferente, é importante referir que em qualquer um dos exemplos, as diferenças são significativas. A manutenção e utilização representam 90% do consumo de energia da habitação standard e 74% na habitação eficiente. De qualquer forma, deste estudo é também possível concluir que quanto mais eficiente for o edifício, maior relevância tem a fase de fabricação e construção. Assim, a capacidade de economizar energia durante a sua vida útil, situação cada vez mais comum na expectativa da construção, atribui à fase de fabricação e construção uma maior responsabilidade e peso no balanço final de consumo de energia de um edifício.

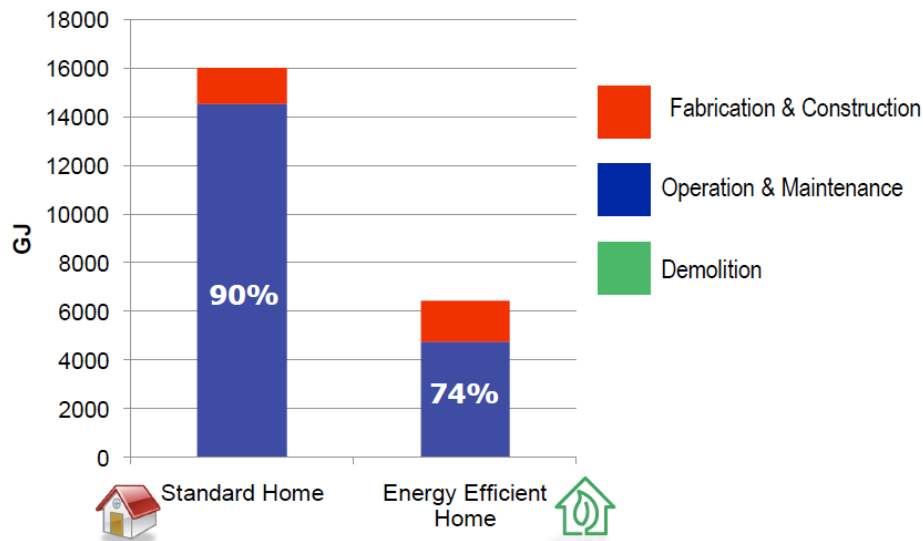


Figure 26 – Consumo de energia ao longo do tempo de vida de 50 anos (Kendall, 2010).

Desta forma, conciliar o estudo dos materiais e do sistema estrutural numa perspectiva de comportamento sustentável permite entender uma parte do desempenho global do edifício. O estudo da estrutura engloba a consideração de todos os elementos que interferem no processo de estabilidade de um edifício, deixando de fora os elementos que, ainda que exerçam funções primordiais no conjunto, não participam nesta ação.

3.2. Objetivos

Com o principal objetivo de comparar o betão e o aço, como materiais estruturais, no que diz respeito ao seu comportamento sustentável, este estudo procurou, em primeiro lugar, encontrar um modelo que permitisse estabelecer uma relação justa entre os dois materiais, sem que as características físicas de cada um se salientassem, em vez das suas características funcionais. Isto é, a comparação entre 1kg de betão e 1kg de aço não seria relevante neste estudo, pois o principal objetivo passa por compará-los como materiais estruturais, sendo que por essa razão não podemos considerar que a mesma quantidade de material sirva o mesmo objetivo estrutural. Desta forma, tornou-se necessário encontrar um sistema estrutural que, para o mesmo objetivo, tivesse duas soluções: uma estrutura em betão e outra em aço. Como o objectivo principal se prende com a comparação entre duas estruturas, é importante definir bases equivalentes, procurando uma unidade comum de referência, de maneira a tornar coerente a comparação entre as duas. Neste caso, é importante que a unidade de referência derive da equivalência funcional, o que significa que os objetos de estudos devem apresentar a mesma função estrutural. Nesta equivalência devem também ser considerados os mesmos pressupostos regulamentares, de segurança

e de esperança de vida, isto é, as duas estruturas devem estar em pé de igualdade no que diz respeito a todas as suas condicionantes.

Procurando responder à questão central de qual o material estrutural mais sustentável, entre o betão e o aço, este estudo não procurou apenas uma resposta singular e definitiva para esta questão, ponderando desde o início que essa resposta talvez não exista, mas promoveu a comparação dos dois materiais nos distintos contextos. Uma vez definidas as duas estruturas, este estudo procurou estabelecer condições para a comparação sustentável entre os dois materiais, apoiado na regulamentação e metodologias existentes. Tendo como base a construção sustentável, esta análise procurou responder aos pontos principais dos três pilares da sustentabilidade: ambiente, economia e sociedade, sendo que os dois primeiros campos são mais quantificáveis, e por isso mais fáceis de encontrar respostas objectivas. No caso da análise social, questões como conforto e saúde dos habitantes, são questões mais subjetivas, e por isso, mais difíceis de quantificar e assumir como valores passíveis de comparação. Por esta razão, essa análise foi feita de uma maneira mais superficial, apoiada em bibliografia e artigos de opinião, e afastando-se da análise quantitativa dos modelos estruturais de referência.

3.3. Metodologia

3.3.1. Unidade funcional

A unidade funcional de uma análise de ciclo de vida tem como objetivo a criação de uma referência de garantia, capaz de fazer a comparação legítima, neste caso, entre dois materiais (Johnson, 2006). Desta forma, foi necessário encontrar uma unidade funcional que permitisse comparar os materiais com base no desempenho estrutural. Assim, foi definido como unidade funcional a quantidade de material necessária para erguer uma estrutura de um piso com cerca de 500m² de área bruta. No entanto, de maneira a poder servir de referência para outras análises comparativas, optou-se por transformar os valores globais referentes à estrutura total em valores de referência por m² de área do edifício. Neste ponto, tornou-se necessário definir qual o tipo de área a considerar. Como o elemento de comparação é um modelo de estrutural, torna-se mais relevante a utilização do valor da área útil que a estrutura tem capacidade de sustentar. Ainda assim, é importante referir que, por razões que se prendem com as características físicas dos elementos estruturais dos dois materiais, a área útil poderia não ser a mesma nos dois exemplos utilizados, se a opção fosse manter os limites originais do edifício. Por esta razão, partiu-se do princípio que a referência é a área útil do edifício, de maneira a poder utilizar valores

médios gerais, que normalmente são apresentados nesta unidade. Assim, a referência de comparação é a capacidade estrutural de um sistema numa área útil total de 474m², não estando incluídos a área de ocupação dos elementos estruturais.

O ponto de partida para este estudo foi um projeto que participou num concurso público para as instalações da Extensão de Saúde da Gandra, em Paredes, distrito do Porto. Com total acesso a todo o processo de arquitectura e especialidades, este projecto foi utilizado como o exemplo de estrutura em betão, sem sofrer qualquer alteração. Para a realização do projecto para a estrutura em aço, foi solicitada a colaboração de um engenheiro civil¹, que se ocupou de executar o projecto de estruturas para o mesmo edifício.

Sem perder o objetivo principal deste estudo, a alteração da estrutura apenas teve em consideração a substituição dos materiais e as consequentes alterações estruturais, deixando de parte qualquer preocupação com os respectivos efeitos no desenho arquitectónico. Este pressuposto estabelece uma situação fictícia, que apenas procura encontrar resposta no âmbito deste trabalho, e não tem como intenção promover a ideia de que uma estrutura, sendo em betão ou em aço, pode ser encarada da mesma forma no seu desenho arquitectónico. A história da arquitetura tem provado, principalmente desde o século XIX, que o tipo de estrutura tem grande influência na arquitetura de um edifício, até mesmo numa solução que passe por esconder a própria estrutura (Castro, 2008).

De início, foi considerada a hipótese de eleger um elemento estrutural como unidade funcional, como uma viga ou pilar, de maneira a tornar o estudo menos complexo, mas a consideração desses elementos isoladamente não atuam com uma função útil no ambiente construído, enquanto que a consideração de uma estrutura completa, ainda que simples, vem desempenhar uma função claramente definida (Johnson, 2006).

3.3.2. Medição de quantidades

Com base na informação de cada projeto, através do mapa de medições e desenhos, foi feita a determinação analítica e ordenada da quantidade de material dos elementos estruturais: fundações (sapatas e lintéis), pilares, vigas e laje do pavimento térreo. Esta análise foi apoiada também na publicação *Curso sobre Regras de Medição na Construção*, do LNEC, de maneira a utilizar uma metodologia geral e reconhecida (Fonseca, 2004).

¹ Eng. João Ferreira, engenheiro civil.

O edifício é constituído por um piso, e por isso, a estrutura completa deveria considerar fundações, pilares, vigas, pavimento térreo e cobertura. Mas, tendo em consideração que o objetivo principal deste estudo passa pela comparação dos dois principais materiais estruturais, foi ponderada a integração da cobertura nesta análise, visto que a constituição desse elemento é muito variada nas duas situações. De uma certa maneira, a cobertura pode não ser considerada como parte da estrutura, mas sim do sistema de encerramento do espaço interior, quando a consideramos como uma fachada. Esta ideia permite também que a medição de quantidade de material seja restrita aos dois materiais em questão, não havendo a introdução de outros elementos que são essenciais para constituição da cobertura. Esta situação é mais flagrante na estrutura metálica, pois uma cobertura que não seja constituída por uma laje em betão, seria sempre uma cobertura constituída por outros elementos, além do aço, sendo difícil de contabilizar neste contexto. Desta forma, foi assumido que o elemento estrutural laje de cobertura não seria contemplado nesta análise, de maneira a reduzir a estrutura à sua constituição mais elementar, como um sistema de pórtico. No entanto, é importante salientar que em qualquer uma das estruturas foram consideradas as coberturas para o cálculo dos elementos constituintes, sendo por isso importante evidenciar a escolha do tipo de cobertura para cada um dos exemplos.

No caso da estrutura em betão armado, a quantificação dos materiais foi dividida em três campos distintos: betão, cofragem e armaduras. As medidas para o cálculo das quantidades foram retiradas dos documentos escritos do projeto de estruturas e dos respectivos desenhos. No caso da estrutura metálica, a quantificação de material foi dividida em quatro campos: betão, cofragem, armaduras e perfis. As medidas foram retiradas do novo projeto de estruturas. Em qualquer um dos casos, não foram considerados materiais de acabamento ou secundários em relação à estrutura. Desta forma, apenas foram considerados os materiais diretamente relacionados com a função estrutural, distinguindo a sua composição, como no caso do betão armado, e contabilizando cada um dos seus elementos constituintes. No caso da cofragem, a decisão de contabilizar a área necessária para erguer os elementos estruturais prendeu-se com a necessidade de perceber as implicações desse tipo de construção, principalmente a nível económico, não sendo considerada na contabilização de impactos ambientais. A integração da cofragem nessa análise ambiental seria tão relevante como a integração de equipamentos, estruturas provisórias (andaimes) ou outros elementos, que são associados a uma obra apenas por um período de tempo, sendo rentabilizados em diferentes obras ao longo do seu tempo de vida. A consideração destes elementos na análise ambiental introduziria um aumento

significativo de complexidade, associado a um maior investimento de recursos, e acabaria por se afastar do objetivo essencial deste estudo. No entanto, na análise económica foi considerada sua utilização tal como a utilização de outros equipamentos, intervenientes na fase de construção da estrutura, sendo vistos como elementos alugados, e por isso utilizados também noutras obras.

A determinação das quantidades foi feita de acordo com o tipo de material, isto é, no caso do betão, foi calculado o volume de cada elemento, através das dimensões descritas nos desenhos e mapas de medições, e o seu respectivo peso, considerando um peso médio de 2500kg/m^3 (Costa e Appleton, 2002). O cálculo dos varões obrigou a uma análise dos desenhos e pormenores de cada elemento estrutural, não adoptando os valores médios de referência. Desta forma, procurou-se atingir um valor mais próximo da realidade. No caso das cofragens, a determinação da área necessária foi feita através da análise da geometria dos elementos estruturais, reconhecendo que não se considera a face superior de cada elemento, nem as áreas de contacto com outros elementos. Por último, em relação ao aço, foi medido o valor linear dos elementos metálicos e calculado o seu peso, recorrendo a tabelas disponíveis com a informação do peso para cada tipo de perfil ou varão.

3.3.3. Limites do estudo

É importante definir o limite do estudo, de maneira a esclarecer os dados que são relevantes para a análise e tudo o que, à parte da sua importância, fica de fora do âmbito do trabalho.

Para a análise de impactos ambientais, tendo como referência a base de dados LCA de materiais de construção da publicação *Avaliação do Ciclo de Vida dos Edifícios* (Bragança e Mateus, 2011) foi considerado a fase “cradle-to-gate”, isto é, foram considerados os impactos ambientais envolvidos na fase de extração das matérias-primas e da sua produção. Assim, são contabilizados os impactos envolvidos na transformação da matéria-prima em componentes de construção, bem como na transformação destes em produto de construção. O sistema termina na porta da fábrica, com os produtos prontos para serem transportados para o local da obra. São assim excluídos deste estudo vários processos, ainda que tenham naturalmente influência no resultado final. Isto é, o transporte de materiais secundários, a produção de equipamentos e respectiva manutenção, entrega de energia, entre outros, são processos que interferem no sistema geral, mas que claramente se apresentam secundários em relação ao processo essencial.

Na análise económica, foram considerados os impactos desde a extração das matérias-primas e produção, incluídos no valor dos materiais/produtos, até à construção/montagem das estruturas, sendo incluída a utilização de equipamentos e mão de obra.

Assim, este estudo não contempla a análise de impactos ambientais e custos na fase de utilização e manutenção das estruturas nem no processo de fim de vida. Esta opção prende-se com o facto de se tratar de uma estrutura e por isso a respectiva interferência indireta na utilização do edifício ser mais reduzida, tornando-se também mais difícil de quantificar. A falta de informação nas bases de dados LCA sobre esta fase impediu também uma consideração mais profunda sobre este assunto. No entanto, neste trabalho são descritos os factos mais relevantes sobre essas fases do ciclo de vida e são considerados como indicadores não quantificados para a comparação entre as duas estruturas.

3.4. Classificação e caracterização dos indicadores sustentáveis

De maneira a realizar uma avaliação sustentável do caso de estudo, é necessário ter em consideração os três pilares da sustentabilidade: ambiente, economia e sociedade. No que diz respeito a avaliações sustentáveis de edifícios, existem já metodologias que procuram determinar quantitativamente o seu desempenho nas três dimensões, como é o caso do SBTool, referido anteriormente. No entanto, para a avaliação de materiais ou de sistemas construtivos, ou neste caso, de estruturas, torna-se mais subjetiva a análise do respectivo comportamento, com especial relevância no que diz respeito à dimensão social.

Assim, para este estudo foi organizado um conjunto de indicadores para cada uma das dimensões, sendo que para o desempenho social foram apenas considerados factores sociais em termos qualitativos, enquanto que nas outras duas dimensões foram determinados desempenhos quantitativos, passíveis de serem diretamente comparados. A escolha dos indicadores para cada dimensão de avaliação foi baseada em regulamentos e metodologias existentes, mas também em escolhas pessoais, resultantes da leitura de bibliografia sobre este tema. Desta forma, o resultado obtido através das escolhas que foram feitas assume aqui um carácter subjetivo, que só pode ser lido e interpretado no conjunto do estudo e tendo em consideração todas as opções que foram feitas ao longo do trabalho.

3.4.1. Indicadores ambientais

As categorias ambientais que estão na base deste estudo são o consumo de energia, as emissões atmosféricas e a contribuição para o esgotamento de recursos naturais. Em cada uma destas categorias foram considerados vários parâmetros ambientais, recolhidos de bases de dados disponíveis.

Para estes estudo foi utilizada a base de dados disponibilizada na publicação *Avaliação do Ciclo de Vida dos Edifícios. Impacte Ambiental das Soluções Construtivas* (Bragança e Mateus, 2011) para materiais construtivos. Nesta publicação foram consultadas sete bases de dados LCI: EPD para cerâmicos de alvenaria (Almeida, Dias e Arroja, 2011), EcoInvent v2.2 (SCLCI, 2010), IDEMAT 2001 (FIDE-DUT, 2001), ETH-ESU 96 (OE, 1996), BUWAL 250 (SAEFL, 1998), DK INPUT OUTPUT (DST, 2010) e Ecology of Buildings Materials (Berge, 2000). Estes programas fornecem valores médios de fluxos de entradas (matéria-prima, energia, etc.) e saídas (emissões) associados à utilização de materiais construtivos. Para a quantificação das categorias de impacto ambiental foram utilizados métodos intermédios de LCA: “CML 2 baseline 2000” (CML 2001), “Cumulative Energy Demand” (Frischknecht, Jungbluth, Althaus e tal, 2003) e “IPCC 2001 GWP” (CC, 2001). A integração dos dados LCI e dos métodos LCA foi feita no programa SimaPro v7.2 (Pré-consultants, 2010), que converteu os valores dos fluxos em potenciais impactos ambientais (Bragança e Mateus, 2011).

A base de dados considerada contempla os impactos ambientais associados à fase “cradle-to-gate” e utiliza uma unidade funcional de 1kg. Nesta avaliação, são considerados os processos que contribuem para a quantificação de impactos ambientais desde a extração de matérias-primas, fabricação e transporte entre os dois locais.

No quadro seguinte são apresentados os valores de impactos ambientais por categoria e parâmetros considerados neste estudo, com os respectivos valores para cada material utilizado. Numa primeira análise, foram considerados os 8 parâmetros isoladamente (de referir que o parâmetro energia não renovável incorporada é utilizado duas vezes em categorias diferentes). No entanto, a consideração das categorias permite entender os impactos ambientais nas respectivas áreas de ação, incluindo os parâmetros que têm influência.

MATERIAIS	CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	BETÃO (Kg)	AÇO EM VARÃO (Kg)	AÇO EM PERFIL (Kg)
IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	6,24E-03	1,52E-01	1,16E-01
		Energia não-Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	5,56E-01	3,27E+01	8,66E+00
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	kg CO2 equiv	1,10E-01	1,25E+00	5,71E-01
		Potencial de Destruição do Ozono (ODP)	kg CFC 11 equiv	3,55E-09	6,16E-08	5,40E-08
		Potencial de Acidificação (AP)	kg SO2- equiv	1,79E-04	5,57E-03	3,04E-03
		Potencial de Eutrofização (EP)	kg (PO4)3- equiv	2,84E-05	1,30E-03	4,86E-04
		Potencial de formação de Ozono Troposférico (POCP)	kg Ethene equiv	6,49E-06	8,29E-04	1,85E-04
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de esgotamento de recursos abióticos (ADP)	kg Sb equiv	2,38E-04	1,29E-02	4,54E-03
		Energia não-Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	5,56E-01	3,27E+01	8,66E+00

Quadro I - Categorias e parâmetros considerados no desempenho ambiental de cada estrutura.

3.4.1.1. Consumo de energia

Os edifícios surgem como grandes consumidores de energia, sendo por isso importante a análise deste tema, quando está em causa o impacto ambiental de um produto ou material. A potencial escassez de energia e a conjuntura económica atual incentivam a necessidade de encontrar fontes de energia alternativas e de melhorar a eficiência energética dos sistemas existentes.

O consumo de energia pode ser considerado em duas fases: a energia incorporada, usada na fase de extração de matéria-prima e fabricação do produto, e a energia operacional, associada à fase de utilização e manutenção. Assumindo que neste estudo não foram considerados os impactos ambientais da fase de utilização e manutenção, a energia operacional fica fora dos limites do estudo. É de referir que no caso de uma estrutura, a energia de utilização e manutenção não é muito relevante, ainda que se deva ter em consideração a potencial necessidade de se efetuarem trabalhos ao longo da vida útil do edifício que possam implicar a manutenção da estrutura. No entanto, sob a perspectiva considerada, não se apresenta relevante a inclusão deste tema nesta avaliação.

Na categoria de consumo de energia incorporada foram considerados dois parâmetros: a energia não renovável incorporada (ENR) e a energia renovável incorporada (ER). Ambos os parâmetros exprimem o consumo de energia durante as fases que se incluem no período “cradle-to-gate” e o conjunto dos dois valores permite determinar o valor da energia consumida.

3.4.1.2. Emissões atmosféricas

Os efeitos de aquecimento global e as consequentes mudanças climáticas, perceptíveis ao longo das últimas décadas, evidenciam a importância da consideração das emissões atmosféricas de que o sector da construção é largamente responsável. A partir do Protocolo de Quioto, proposto em 1997 e posto em prática a partir de 2005, tornou-se evidente que as emissões atmosféricas ocupariam um lugar de destaque nas políticas ambientais. Neste tratado internacional, foram estabelecidos compromissos por cada país envolvido para a redução da emissão de gases nocivos para a saúde humana e consequente diminuição do efeito de estufa, que é a principal causa do aquecimento global (<http://www.kyotoprotocol.com/>). As políticas ambientais vieram assim pressionar a indústria da construção, entre outras áreas, a responder aos novos desafios e desenvolveram condições de concorrência com base na promoção de preocupações ambientais.

A introdução do conceito de Edifícios Carbono Zero tem também incentivado uma atitude pró-ativa na procura de diminuição do efeitos de gases de estufa, promovendo o desenvolvimento de edifícios que procuram a compensação das suas emissões de dióxido de carbono, através da introdução de tecnologia própria ou de elementos vegetais, que através da fotossíntese permitem a absorção das emissões (<http://www.carbono-zero.com>). Assim, procura-se anular as emissões de carbono, que são inevitáveis para o funcionamento do edifício, com sistemas de compensação desse mesmo carbono, atingindo um balanço zero.

Figure 27 - Equação de Edifícios de Carbono Zero (fonte: <http://www.carbono-zero.com>)

Nesta categoria são considerados cinco parâmetros: o potencial de aquecimento global, o potencial de destruição da camada de ozono, o potencial de formação de ozono troposférico, o potencial de acidificação e o potencial de eutrofização. Todos estes parâmetros procuram esclarecer a contribuição do material em causa para as diferentes ações que potenciam as emissões atmosféricas.

O potencial de aquecimento global (GWP), também conhecido como alterações climáticas ou carbono incorporado, representa um dos parâmetros transversais a quase todas as análises LCA, pela influência que tem na saúde humana e ecossistemas. Este parâmetro avalia a contribuição do ciclo de vida do material para o efeito de estufa, a partir das emissões de dióxido de carbono (CO₂) de que é responsável. É na fase de extração e fabricação que a quantidade de emissões de CO₂ é mais significativa, principalmente pela

utilização de combustíveis fósseis, mas também pela calcinação de calcário no cimento e da libertação de agentes HFC na produção de espumas de isolamento (Anderson, 2012).

O potencial de destruição da camada de ozono (ODP) quantifica a reação dos gases em contacto com a camada de ozono, que submetidos à radiação ultravioleta libertam moléculas de radicais livres, que por sua vez destroem a própria camada de ozono. As respectivas consequências passam pela diminuição da capacidade de filtrar os raios ultravioleta para a superfície terrestre, cuja intensidade tem consequências negativas e diretas na saúde humana, bem como produções agrícolas, ecossistemas e comportamento dos materiais expostos (Anderson, 2012). De maneira a repor os valores normais da camada de ozono, num processo que é natural mas lento, foi criado o Protocolo de Montreal, em 1989, que promoveu a extinção da produção das substâncias que contêm os gases prejudiciais e consequentemente a proibição de utilização em produtos comercializados, substituindo-os por substâncias menos perigosas.

O potencial de formação de ozono troposférico (POCP) põe em evidência a criação de ozono e outros poluentes através da oxidação fotoquímica, relacionada com a radiação ultravioleta. A consequência mais comum são os smogs, que surgem principalmente nas grandes cidades e que alteram a atmosfera, provocando problemas no sistema respiratório humano e nas produções agrícolas. Este acontecimento surge principalmente pela reação das emissões de óxidos de nitrogénio (NO_x) através da combinação de oxigénio e nitrogénio, que acontece nas emissões dos combustíveis ou de tintas e revestimentos. Por esta razão se pode concluir que a indústria da construção tem grande responsabilidade nesta área e deve ser especialmente ativa na diminuição destas emissões (Anderson, 2012).

O potencial de acidificação (AP) está relacionado com a formação de chuvas ácidas, resultantes de gases ácidos, como o dióxido de enxofre (SO_2), em contacto com a água da atmosfera. Este fenómeno tem repercussões graves ao entrar em contacto com a superfície terrestre, tanto no património vegetal como no património construído. Os gases responsáveis por este efeito são normalmente libertados na queima de combustíveis fósseis, especialmente a partir do carvão e do petróleo, processos amplamente utilizados na indústria da construção.

Por fim, nesta categoria é ainda considerado o potencial de eutrofização (EP) que indica o aumento de concentrações de nitratos e fosfatos na água, solo ou ar, que em maior quantidade têm efeitos prejudiciais na saúde humana e no equilíbrio dos ecossistemas. Na indústria da construção, este parâmetro pode ser altamente influenciado por mau

escoamento de locais de construção, falta de manutenção de drenagens e produção intensiva de produtos que possam contribuir para este fenómeno (Anderson, 2012).

3.4.1.3. Esgotamento de recursos naturais

Por último, foi considerado neste estudo o potencial de esgotamento de recursos, com base na necessidade de extração e utilização de recursos naturais para a fabricação dos materiais em causa. Nesta categoria foi considerado o potencial de esgotamento de recursos abióticos, sendo que alguns dos parâmetros anteriormente referidos, na categoria de emissões atmosféricas, põe também em causa os recursos naturais utilizados, ainda que como consequência secundária. A energia não renovável incorporada nos materiais utilizados, parâmetro já considerado na categoria de energia consumida, foi também considerado para a contribuição para o esgotamento de recursos naturais.

Assim, o potencial de esgotamento de recursos abióticos tem como objetivo a determinação da responsabilidade dos processos envolvidos no ciclo de vida do objeto de estudo, que ao utilizarem recursos naturais contribuem para a diminuição dos recursos não renováveis ou recursos lentamente renováveis. A construção consome recursos naturais em larga escala, especialmente metais e combustíveis fósseis, pondo em evidência a importância de considerar este parâmetro na evolução dos processos que utiliza. Este factor tem especial preocupação com a disponibilidade de recursos no futuro, promovendo a gestão de recursos consumidos no processo de fabricação dos materiais ou produtos (Anderson, 2012).

Da mesma forma, a consideração da energia não renovável incorporada nesta categoria põe em evidência a contribuição da utilização de fontes energéticas não renováveis para o esgotamento de recursos. A procura de soluções alternativas a este tipo de energia favorece a diminuição dos impactos ambientais dos produtos, tendo principalmente em consideração a disponibilidade de recursos no futuro.

3.4.2. Indicadores económicos

Na dimensão económica, este estudo tem em consideração uma só categoria: o custo de construção, que por sua vez têm em consideração o custo de materiais, custo de equipamento e custo de mão de obra. Como já foi referido, os custos relacionados com a fase de utilização e manutenção estão fora do limite deste trabalho, bem como os custos associados à demolição e deposição em aterro, ou reciclagem. De qualquer modo, ainda que não tenha sido feita uma avaliação quantitativa dos valores envolvidos, nas

considerações sobre o desempenho económico de cada uma das estruturas, foi feita referência às principais características de cada material que possam influenciar esses custos.

3.4.2.1. Custo de construção

Sobre o custo de construção, foi consultada a publicação *Informação sobre custos. Fichas de rendimentos* (Fonseca, 2007), do LNEC, na versão atualizada de dezembro de 2007. Foi também consultado o orçamento apresentado no concurso do projeto da Extensão de Saúde da Gandra, em maio de 2005, de maneira a completar o estudo em situações de falta de informação sobre determinados produtos da estrutura.

Nesta publicação, são apresentadas fichas de rendimentos de cada operação que constitui a construção de um edifício. Utilizando o método de composição de custos, os custos totais de cada operação resultam do “somatório dos custos unitários dos recursos aplicados multiplicados pelas respectivas quantidades necessárias à execução de uma unidade elementar na medição do trabalho de construção” (Fonseca, 2007). Para cada operação considerada, a ficha de rendimento tem disponível várias informações, entre as quais, os custos diretos (com material, equipamentos e mão de obra), os custos de operação (incluindo custos indiretos) e os custos totais (que incluem também um valor de lucro). Desta forma, o valor considerado neste parâmetro é o somatório dos valores totais de cada operação, incluindo custos diretos, indiretos e lucro.

De uma maneira mais direta, foram também analisados os custos de materiais, equipamentos e mão de obra isoladamente, de maneira a perceber o peso de cada um destes indicadores na comparação entre as estruturas.

3.4.3. Considerações sociais

Como já foi referido, a consideração do desempenho social de uma estrutura é uma tarefa complicada, pois, isoladamente, esta não tem uma função social com impacto relevante no ambiente construído. De qualquer forma, a sua existência, como resultado de vários processos, e a sua contribuição para o conjunto, têm influência no desempenho global do edifício, e por isso é possível eleger alguns parâmetros gerais para esta análise, ainda que possam apenas servir de reflexão subjetiva do desempenho de cada estrutura e da sua comparação.

Desta forma, foram considerados as seguintes categorias de desempenho social: segurança da estrutura, conforto e saúde dos utilizadores, planeamento da construção e

qualidade arquitectónica dos edifícios. Na primeira categoria, foram considerados três parâmetros principais que podem pôr em causa a segurança dos ocupantes do edifício: a resistência ao fogo, a ductilidade e a durabilidade. No que diz respeito à categoria sobre o conforto e saúde dos ocupantes, foi considerada a influência da utilização dos materiais em estudo no conforto térmico e o conforto acústico dos ocupantes. Sobre o planeamento da construção, foram considerados factores que interferem na qualidade de vida da sociedade, sendo de referir o tempo de duração da obra, o potencial de reciclagem bem como a produção de desperdícios. É de salientar que estes dois últimos parâmetros têm também efeitos claros no desempenho ambiental, sendo que neste contexto são considerados na perspectiva da sua influência no meio envolvente do edifício. Por fim, foi considerada a qualidade arquitectónica proporcionada pela utilização de cada um dos materiais, ainda que este seja o factor considerado que é mais subjetivo, a começar pela própria definição de “qualidade arquitectónica”. No entanto, foram considerados dois parâmetros: a trabalhabilidade, como habilidade e liberdade das formas resultantes, e o rigor e qualidade dos resultados, com relação direta com a execução da estrutura.

Os dez parâmetros foram considerados de uma forma qualitativa, não sendo, por isso, necessário considerar as duas estruturas específicas. Desta forma, foram tidas em consideração as características gerais das estruturas de betão e de aço e a respectiva relação entre ambas.

3.5. Normalização e agregação

A maneira mais simples de comparar resultados é fazê-lo através da comparação direta de valores em cada um dos parâmetros estudados. Desta forma, para cada tipo de desempenho, é possível identificar a estrutura com melhor comportamento e até identificar a percentagem de diferença entre os dois desempenhos, de maneira a poder perceber o seu significado. No entanto, esta metodologia não permite tirar mais conclusões sobre a relação entre os dois materiais, pois a comparação entre valores de unidades diferentes não é viável, como aconteceria na comparação dos resultados dos parâmetros ambientais. Ainda assim, este estudo apresenta a comparação direta entre valores resultantes em cada parâmetro, bem como a relação percentual dos mesmos.

Para comparar os resultados nas diferentes categorias, é necessário submeter os valores à fase de normalização, de maneira a converter os dados para a mesma unidade. Só desta forma se torna viável a utilização de dados de diferentes parâmetros numa comparação. Uma forma de fazer a normalização de valores é a consideração de dois

valores de referência: valores que representem o melhor e o pior desempenho em cada parâmetro.

Utilizando os dois valores envolvidos e relacionando-os com o valor resultante do estudo em causa ², é possível posicionar o comportamento resultante no panorama de resultados possíveis, que varia entre o pior e o melhor resultado. Este método é utilizado, por exemplo, na metodologia SBTTool^{PT}-H (Bragança e Mateus, 2009).

3.5.1. Desempenho ambiental

É assim importante encontrar os valores de referência no contexto da avaliação de estruturas, sendo que este estudo se baseou na metodologia referida (Bragança e Mateus, 2009), no parâmetro P1, que avalia o impacto ambiental do ciclo de vida do edifício, e utiliza uma estrutura base como prática convencional (que representa o valor de pior desempenho) e considera a melhor prática a estrutura que seja responsável por 25% dos impactos ambientais da prática convencional. Nesta metodologia, a prática convencional é representada por uma estrutura de betão armado, num sistema porticado simples de pilar e viga, em que são apresentados os valores de impactos ambientais. É de salientar que as dimensões e quantidades de material da estrutura apresentada foram calculadas com base em valores médios, como por exemplo, no que diz respeito à densidade para as armaduras, em que foi considerado o valor de 100kg/m³. Nos cálculos realizados para a estrutura em betão que faz parte do caso de estudo, a densidade é de 60,58 kg/m³, o que naturalmente conduz a resultados significativamente diferentes, no que diz respeito ao desempenho ambiental. Por essa razão, a estrutura de referência considerada para esta análise foi uma estrutura de betão armado, com a mesma dimensão da estrutura utilizada para o caso de estudo, mas utilizando os valores de impactos ambientais disponibilizados pela mesma base de dados para o material “betão armado”, onde foram considerados valores médios dos materiais constituintes, representando desta forma uma estrutura próxima do convencional. Assim, apesar de ser uma estrutura semelhante à estrutura A, considerada pelo caso de estudo, os resultados são distintos pela maneira como foram calculadas as quantidades de material e os seus respectivos impactos ambientais.

Outra questão que se coloca na análise de resultados é a agregação dos parâmetros para uma avaliação global do objeto de estudo. Esta etapa implica a determinação de um resultado global do desempenho do material, através da atribuição de

² Valor normalizado = (valor resultante – valor do pior desempenho) / (valor do melhor desempenho – valor do pior desempenho)

pesos a cada parâmetro, consoante a sua importância relativa no conjunto. A atribuição pode ser direta, considerando por exemplo que todos os parâmetros têm o mesmo peso, ou pela consideração de que nem todos os parâmetros têm a mesma influência no desempenho ambiental do objeto. Em qualquer um dos casos, é assumido o valor relativo de cada parâmetro e por isso é introduzido no estudo um carácter subjetivo e de difícil consenso.

Através da análise das metodologias existentes e de uma interpretação pessoal da importância de cada parâmetro, factor subjetivo que já foi introduzido neste estudo através da seleção dos parâmetros e respectiva distribuição pelas categorias, o peso relativo das categorias de desempenho ambiental foi dividido igualmente entre as três apresentadas, considerando, desta forma, que o impacto ambiental do consumo de energia representa o mesmo que o das emissões atmosféricas ou o do esgotamento de recursos naturais. Por ser uma opção relativamente subjetiva, foi também feita uma análise de sensibilidade, que implicou fazer variar os pesos de cada categoria e analisar o impacto dessas alterações no resultado final. No que diz respeito ao peso relativo de cada parâmetro dentro das categorias, foi também distribuído o mesmo valor a todos os parâmetros. No caso do consumo de energia, o balanço entre os dois parâmetros assume o peso total desta categoria.

3.5.2. Desempenho económico

Para a definição do desempenho económico isolado, a normalização não seria necessária, pois apenas foi considerado o parâmetro de custos de construção, mantendo a mesma unidade, em euros, o que permitiria interpretar diretamente a comparação dos valores de cada estrutura. No entanto, a necessidade de posicionar o comportamento económico de cada estrutura no comportamento sustentável, principalmente em relação ao desempenho ambiental, obrigou também à normalização do valor de custo de construção, através da utilização de valores de referência, tal como foram considerados na normalização dos resultados dos impactos ambientais. Assim, tornou-se necessário considerar o comportamento económico de duas estruturas de referência, para melhor e pior desempenho, de maneira a estabelecer uma escala de posicionamento para as estruturas estudadas. O acesso a valores médios de custo de construção de estruturas não se mostrou uma tarefa fácil, pois a distinção dos custos de construção referentes a elementos diferentes do mesmo edifício não é normalmente considerada. Por esta razão, foi necessário encontrar uma metodologia apropriada para definir os valores de referência,

partindo de valores médios de construção global e da consideração de uma percentagem atribuída ao valor da estrutura. Sendo que esta percentagem não é consensual, foi feita uma análise ao orçamento do edifício em estudo, disponível no processo do concurso, onde foi calculado o peso relativo do custo da estrutura em relação ao custo do edifício no seu conjunto. Ainda assim, foi feita uma análise de sensibilidade sobre este valor, de maneira a criar vários cenários e interpretar as respectivas diferenças nos resultados.

Para a definição dos valores médios de construção, foi necessário encontrar uma base de dados de referência. Assim, e à semelhança do que é feito na metodologia SBTool^{PT}-H (Bragança e Mateus, 2009), foram consultados os valores do Inquérito da Avaliação Bancária na Habitação, publicados pelo INE, onde são identificados valores médios de custos por m² de área útil de imóveis (<http://www.ine.pt>). Este documento identifica os valores médios de transações de imóveis de habitação, consoante a tipologia e a localização geográfica. Ainda que estes valores não representem exatamente o que representam os resultados obtidos no desempenho económico de cada estrutura, são ainda assim indicativos na perspectiva do que se pretende avaliar, ainda que sejam bastante vulneráveis ao contexto social em que são avaliados. Por essa razão, foram considerados os valores atribuídos para o primeiro trimestre de 2008, período coincidente com a atualização da publicação utilizada como base de dados da análise económica feita para as duas estruturas, de maneira a aproximar o mesmo contexto económico das diferentes referências.

No panorama da informação existente, estes valores mostram-se mais indicados do que, por exemplo, o valor atribuído ao custo médio de construção, publicado anualmente em Diário da República, e que define o valor a ser considerado nas avaliações de IMI - Imposto Municipal de Imóveis. O valor atribuído para o ano de 2008 foi de 571,22 euros, que serve para abranger os vários tipos de construção existente e que se afasta dos valores reais de construção que estamos a considerar, podendo implicar uma alteração de interpretação dos resultados. Assim, utilizando os valores da avaliação bancária do INE, foi considerada a tipologia de moradia T5 ou superior, por ser a tipologia que se aproxima mais do edifício estudado. Para manter os valores médios a nível nacional, tal como os que foram apresentados na publicação do LNEC, foram considerados os valores médios que cobrem o território do Continente. Dos valores que o documento apresenta, foi considerada a média do custo por m² de área útil do quartel com as avaliações mais baixas para o melhor desempenho e a média global do custo por m² de área útil para o pior desempenho, à semelhança do que é feito no sistema SBTool^{PT}-H (Bragança e Mateus, 2009). Aplicando a percentagem calculada para o valor da estrutura no valor global do custo do edifício,

foram assim definidos os valores para melhor e pior desempenho no custo de construção da estrutura. Estes valores permitiram determinar o desempenho económico de cada estrutura, na mesma escala, compatível com os valores resultantes da avaliação ambiental, permitindo analisar do comportamento de cada estrutura no conjunto das duas dimensões sustentáveis.

3.5.3. Desempenho sustentável

Como os impactos sociais não foram contabilizados da mesma forma que os outros indicadores, não foi possível atingir o valor do comportamento social de cada estrutura, impossibilitando a comparação global do desempenho sustentável, nas três dimensões essenciais. Por isso, no que diz respeito à análise do comportamento das estruturas, como desempenho sustentável, foram consideradas as duas áreas quantificadas, a dimensão ambiental e económica. De qualquer forma, as considerações sociais ocupam também lugar nas considerações sobre o comportamento geral de cada estrutura, não tendo sido por isso negligenciadas.

Na análise do desempenho sustentável, foi introduzida a importância relativa das duas dimensões, de maneira a estabelecer uma relação entre as duas e a permitir a comparação final das duas estruturas. Mais uma vez, foi feita uma análise de sensibilidade sobre a importância dada a cada dimensão, criando vários cenários e analisando os respectivos resultados.

3.6. Estrutura A

3.6.1. Descrição da estrutura

Para responder ao concurso para as instalações da Extensão de Saúde a construir na Gandra, Paredes, pertencente à Administração Regional de Saúde do Norte, foi desenvolvido o projeto de um edifício térreo, em forma de L, com cerca de 500m² de área bruta. O edifício é estruturalmente constituído por lajes aligeiradas com vigotas pré-esforçadas com 0,28m de espessura, apoiadas sobre estruturas porticadas de vigas e pilares, sapatas e lintéis de fundação. As vigas interiores são embebidas na laje por forma a libertar os tectos para a passagem de condutas. O travamento do edifício face às ações horizontais é assegurado pelas estruturas porticadas constituídas por vigas e pilares.

Para a estrutura em betão armado foi utilizado o betão de classe de resistência C20/25 (B25), 2ª classe de exposição, mínima dosagem de ligante de 300kg/m³ e máxima

relação água/cimento de 0,55. Para o betão de limpeza foi utilizado o betão C12/15 (B15), com mínima dosagem de ligante de 200kg/m^3 . O aço utilizado para os varões foi o A400NR e para as redes electrossoldadas o aço A500EL. O pavimento térreo foi constituído por uma laje de betão de 0,12m de espessura, armada com uma malhasol AQ38. Na elaboração do projeto, é adoptada a regulamentação portuguesa em vigor à época, nomeadamente o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes e o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado.

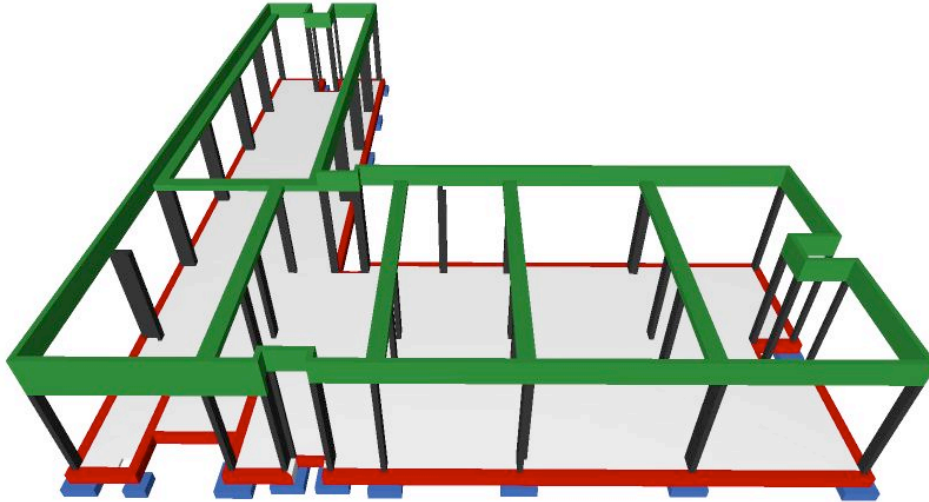


Figure 28 - Esquema da estrutura A.

Com base no mapa de medições e desenhos do projeto de estruturas do edifício, foi assumida a nomenclatura utilizada para identificar os elementos estruturais. Para cada elemento, foi analisada a sua geometria e calculada a quantidade de material. Foi feito um esforço especial para calcular um valor aproximado da realidade para a quantidade de aço dos varões das armaduras, tendo em conta todas as indicações feitas pelos projetistas de estruturas.

Assim, o cálculo da quantidade de betão utilizado para os elementos estruturais foi dividido consoante o tipo de betão (C20/25 e C12/15) e determinado através do cálculo simples da volumetria de cada elemento com o respectivo peso do material por m^3 . No que diz respeito à quantidade de aço, o cálculo foi feito através das especificações do projeto de estruturas, assumindo as diferentes dimensões dos vários varões utilizados e os respectivos pesos, baseados em tabelas gerais. Quanto à quantidade de cofragem necessária para erguer esta estrutura, foi calculada através da geometria de cada elemento, sem considerar a face superior do mesmo, nem as áreas de contacto com outros elementos. Os resultados foram confirmados com os dados fornecidos pelo mapa de

quantidades. A cofragem foi calculada em m^2 , reconhecendo-a como área utilizada, mas o aço e betão utilizados foram calculados em kg e m^3 , pela utilização generalizada destas unidades de medida neste tipo de estudo e também nos inventários de ciclo de vida.

3.6.2. Análise da estrutura

O cálculo da quantidade de material para a estrutura A é apresentado em anexo, com a distinção dos elementos estruturais, referenciados na planta, e dos respectivos valores. No quadro seguinte são apresentados os valores globais referentes aos materiais utilizados nos vários tipos de elementos, bem como os valores gerais de peso e volume da estrutura. A área necessária para a cofragem é também apresentada.

ESTRUTURA A	BETÃO TOTAL (Kg)	AÇO EM PERFIL (Kg)	AÇO EM VARÃO TOTAL (Kg)	PESO TOTAL (Kg)	VOLUME TOTAL (m^3)	COFRAGEM (m^2)
PILARES	59408,40	0,00	2746,00	62154,40	23,76	312,99
VIGAS	105536,75	0,00	3401,50	108938,25	42,21	348,41
SAPATAS	79707,50	0,00	694,30	80401,80	31,88	88,64
LINTÉIS	131656,97	0,00	4121,54	135778,51	52,66	261,88
PAV. TÉRREO	153127,92	0,00	903,45	154031,37	61,25	0,00
TOTAL ESTRUTURA	529437,54	0,00	11866,79	541304,33	211,78	1011,92
TOTAL POR m^2	1116,96	0,00	25,04	1141,99	0,45	2,13

Quadro II - Quantidade de material calculado para a estrutura A

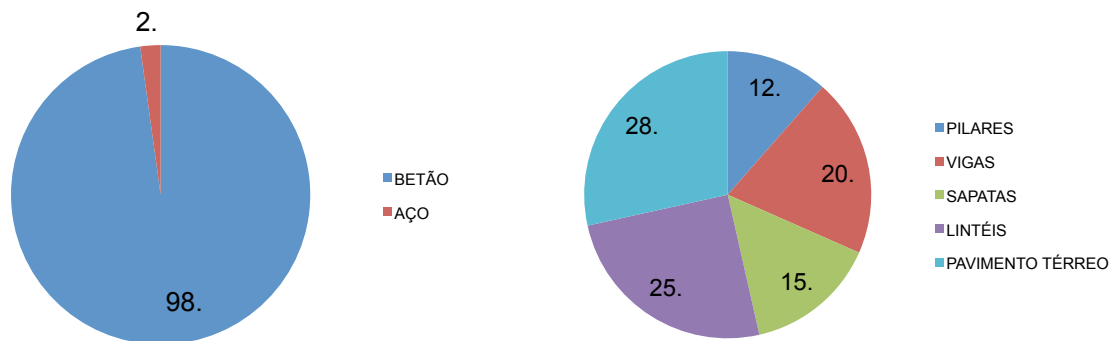


Gráfico 1 - Percentagem dos materiais utilizados na estrutura A.

Gráfico 2 - Percentagem de quantidade de material utilizado por cada tipo de elemento no conjunto da estrutura A.

A estrutura A, como estrutura em betão armado, apresenta o betão como principal material na sua composição, sendo responsável por cerca de 98% do seu peso total. Assim, o aço, que está presente nas armaduras dos elementos de betão armado, representa apenas 2% do peso total da estrutura. De referir que, no que diz respeito à utilização dos

materiais, é o pavimento térreo que apresenta a maior contribuição para o peso total da estrutura, com cerca de 28%, seguido dos lintéis com 25%.

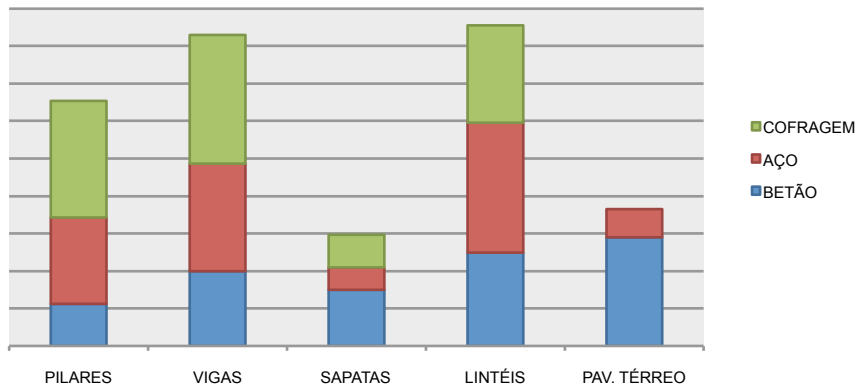


Gráfico 3 - Percentagem de utilização de cada material por elementos estrutural (estrutura A).

No que diz respeito especificamente à utilização do betão, é o pavimento térreo que utiliza mais este material, em consonância com a informação anterior. No uso de armaduras de aço, os lintéis são responsáveis pelo maior contributo no peso total da estrutura, seguidos das vigas. Sobre as cofragens, são as vigas que necessitam de maior área da estrutura em madeira, seguido dos pilares.

A análise do desempenho ambiental, económico e social da estrutura A é feita no capítulo 3.8, em conjunto com a estrutura B, bem como nos anexos apresentados.

3.7. Estrutura B

3.7.1. Descrição da estrutura

Para responder ao objetivo principal deste estudo, a comparação entre a estrutura de betão e a estrutura de aço, foi desenvolvido um projeto de estruturas alternativo ao projeto existente para o edifício da Extensão de Saúde da Gandra, exposto no capítulo anterior. Desta forma, foi desenvolvida uma estrutura em aço para substituir a original em betão armado, com a colaboração de um engenheiro civil.

É importante reforçar a ideia de que está em causa neste estudo a comparação entre estruturas como quantidade de material utilizado e consequentes impactos ambientais, sendo por isso pouco relevante neste contexto a consideração de questões relacionadas com a arquitetura e organização do espaço interior. Por esta razão, o desenho do edifício não foi alterado, não tendo sido feita qualquer adaptação à estrutura metálica, o que deixa por definir soluções construtivas para a fachada e cobertura, e respectivos

pormenores. Ainda assim, tornou-se relevante a consideração de uma solução para a cobertura de maneira a considerar a sua estrutura de suporte, bem como a contribuição do seu peso para o cálculo da estrutura geral. Desta forma, foi considerada uma cobertura em painéis sandwich, constituídos por chapa de aço e lã de rocha de alta densidade, com as superfícies revestidas por película de poliéster de 25 microns. De maneira a utilizar o mínimo de betão na estrutura metálica, diferenciando-a o mais possível da estrutura original, a utilização de painéis mostrou-se uma solução alternativa à laje de betão, sendo um sistema com bom comportamento acústico e térmico e com boa resistência ao fogo. A acrescentar a estas características, é uma solução leve, principalmente em comparação com a laje de betão, entrando em consonância com a estrutura em que se integra.

Desta forma, foi apresentado uma estrutura metálica, constituída por elementos em perfis de aço do tipo HEB160 e HEB100 para os pilares e do tipo HEA160A e HEA160B para as vigas. Para a fixação dos painéis de cobertura são ainda utilizados perfis C170x2,5. Apesar de existirem soluções de fundações constituídas por aço (em estacas, por exemplo), a solução mais comum é utilizar elementos em betão armado para as fundações de estruturas metálicas. Desta forma, foi considerada uma solução semelhante à solução apresentada na estrutura de betão armado, incluindo também a solução para o pavimento térreo. Ainda que esta estrutura metálica tenha um peso diferente da estrutura em betão, que poderia implicar uma diminuição das dimensões das fundações originais, a adaptação destas não se mostrou relevante pelo facto de apresentarem já por si dimensões reduzidas, sendo que na prática comum não seriam considerados elementos de fundação mais pequenos dos que apresentados na estrutura original.

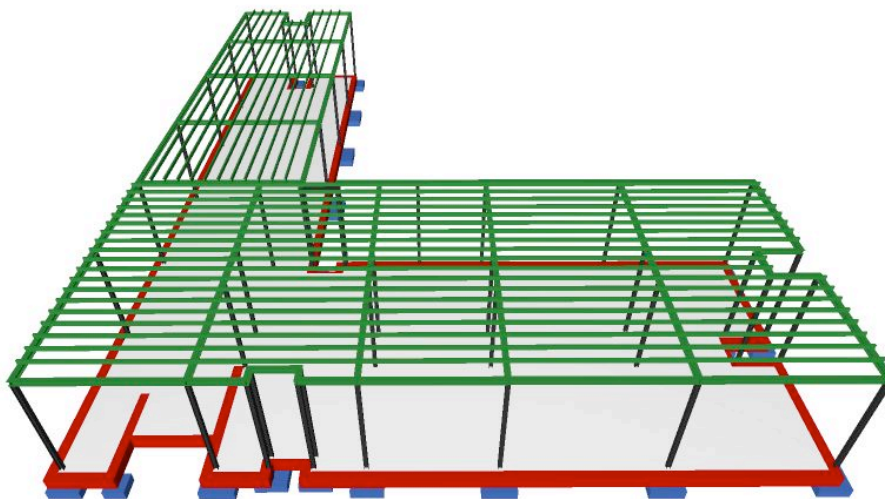


Figure 29 - Esquema da estrutura B.

Ao ser considerada a mesma solução de fundações e pavimento térreo, poderíamos ter excluído estes elementos deste estudo, em ambas as estruturas, pois representam a mesma quantidade de material e consequentemente os mesmos impactos. No entanto, foi importante para este estudo a consideração da estrutura como um todo, como uma potencial realidade no ambiente construído, sendo por isso necessária a consideração de todos os seus elementos constituintes. Além disso, esta condição permite ter uma ideia global do peso total de cada estrutura e da percentagem que cada material, betão e aço, representa em cada uma das estruturas, partindo do princípio que nenhuma delas é exclusivamente constituída por um só material.

3.7.2. Análise da estrutura

As medições desta estrutura foram feitas com base nas indicações do projeto de estruturas e o peso dos elementos foi calculado com base na consulta de tabelas gerais destes elementos standard. No que diz aos elementos em betão armado, as medições foram feitas à semelhança das realizadas na estrutura em betão. O resumo das quantidades utilizadas na estrutura B são apresentadas no quadro seguinte, sendo que em anexo são apresentados detalhadamente os valores envolvidos na medição de quantidades da estrutura B.

ESTRUTURA B	BETÃO TOTAL (Kg)	AÇO EM PERFIL (Kg)	AÇO EM VARÃO TOTAL (Kg)	PESO TOTAL (Kg)	VOLUME (m3)	COFRAGEM (m²)
PILARES	0,00	8076,86	0,00	8076,86	1,03	0,00
VIGAS	0,00	15705,89	0,00	15705,89	2,00	0,00
SAPATAS	79707,50	0,00	694,30	80401,80	31,88	88,64
LINTÉIS	131656,97	0,00	4121,54	135778,51	52,66	261,88
PAV. TÉRREO	153127,92	0,00	903,45	154031,37	61,25	0,00
TOTAL ESTRUTURA	364492,39	23782,75	5719,29	393994,43	148,83	350,52
TOTAL POR m²	768,97	50,17	12,07	831,21	0,31	0,74

Quadro III - Quantidade de material calculado para a estrutura B.

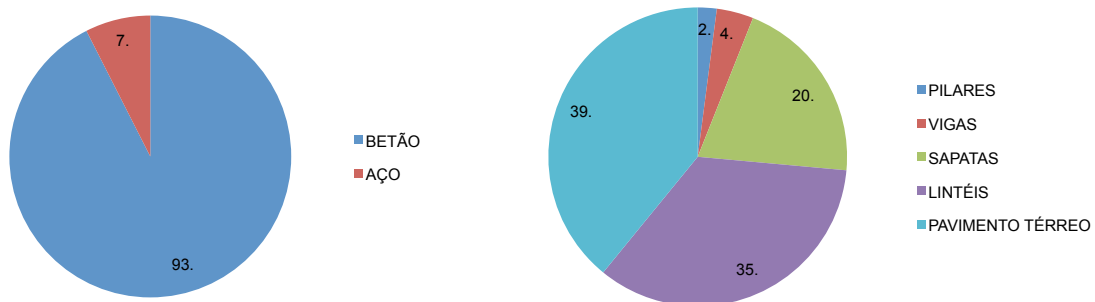


Gráfico 4 - Percentagem dos materiais utilizados na estrutura B.

Gráfico 5 - Percentagem de quantidade de material utilizado por cada tipo de elemento no conjunto da estrutura B.

Apesar de ser definida como estrutura em aço, a estrutura B apresenta o betão como o material mais utilizado na sua composição, responsável por 93% do peso total da estrutura, sendo o aço em perfil responsável por 6% e o aço em varão por 1%. Principalmente por causa do betão utilizado, o pavimento térreo é o elemento responsável pela maior quantidade de material, seguido dos lintéis e das sapatas. Os elementos que não são constituídos por betão são os que utilizam menos material, pelo desenho esbelto que apresentam.

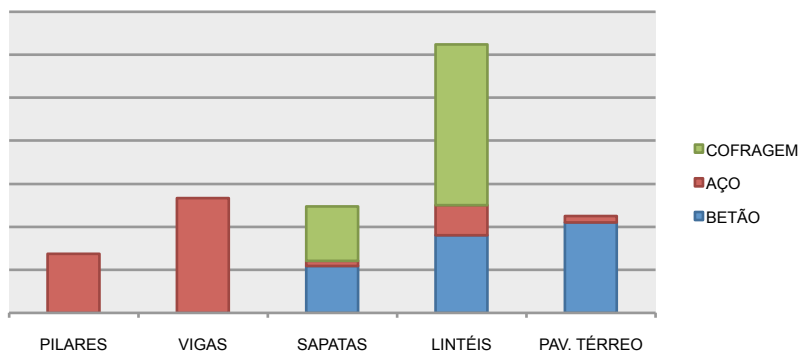


Gráfico 6 - Percentagem de utilização de cada material por elementos estrutural (estrutura B).

Não sendo utilizado nos pilares e vigas, responsáveis pela utilização do aço em perfil, o betão tem maior presença no pavimento térreo, à semelhança do que acontece na estrutura A. Os lintéis são os elementos com maior responsabilidade no que diz respeito à utilização de cofragem, no conjunto total da estrutura. No que diz respeito à utilização do aço, as vigas são responsáveis por cerca de 66% do total, sendo que os pilares utilizam 44%.

Tal como foi referido anteriormente, a análise do desempenho ambiental, económico e social da estrutura B é feita no capítulo 3.8, em conjunto com a estrutura A, bem como nos anexos do trabalho.

3.8. Comparação entre as estruturas

3.8.1. Quantidade de material

A comparação entre a estrutura em betão armado (estrutura A) e a estrutura metálica (estrutura B) no que diz respeito à quantidade de material utilizado, peso e volume está representada no quadro seguinte. Em todas as parcelas, a estrutura A mostra indicadores mais altos do que a estrutura B, com a excepção da quantidade de aço em perfil, material que não é utilizado na estrutura em betão.

COMPARAÇÃO	BETÃO TOTAL (Kg)	BETÃO POR m ²	AÇO TOTAL (Kg)	AÇO POR m ²	PESO TOTAL (Kg)	PESO POR m ²	VOLUME TOTAL (m ³)	VOLUME POR m ²	COFRAGEM (m ²)
ESTRUTURA A	529437,54	1116,96	11866,79	25,04	541304,33	1141,99	211,78	0,45	1011,92
ESTRUTURA B	364492,39	768,97	29502,04	62,24	393994,43	831,21	148,83	0,31	350,52
DIFERENÇA (%)	31,2%		59,8%		27,2%		29,7%		65,4%

Quadro IV - Comparação da quantidade de material entre a estrutura A e a estrutura B.

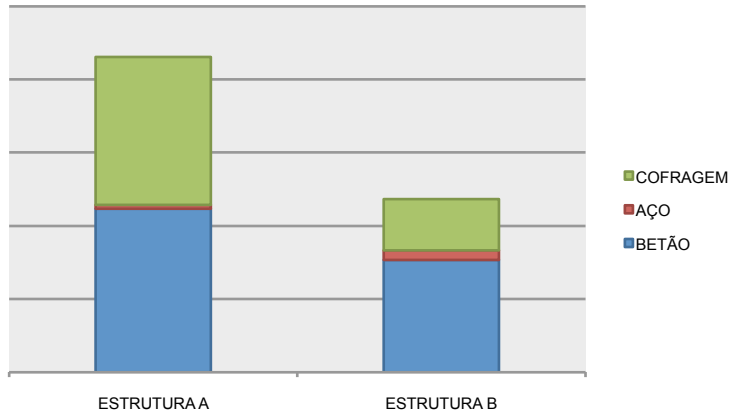


Gráfico 7 - Comparação da quantidade de material utilizado nas duas estruturas.

Assim, com base nos resultados obtidos, podemos afirmar que para erguer a estrutura em betão é necessário mais 31% de betão e mais 65% de cofragem. Estes valores são expectáveis, tendo em consideração que a estrutura A representa uma estrutura em betão armado, sendo que por isso estes materiais dominam o sistema. Assim, estes valores só não são mais acentuados porque a estrutura B é também constituída por elementos em betão armado, correspondentes às fundações e pavimento térreo, tal como já foi referido anteriormente. Por representar o material por excelência da estrutura metálica (estrutura B), o aço domina este sistema ao utilizar mais 60% do que a estrutura A.

Quanto ao peso total da estrutura, as diferenças são também significativas, sendo que a estrutura A pesa mais 27% do que a estrutura B. Também no que diz respeito ao volume, a estrutura A apresenta mais 30% de volume que a estrutura B. Estes valores são o reflexo da geometria dos elementos estruturais, que por sua vez resulta das principais características de cada material. Apesar do aço ser mais pesado do que o betão armado, as suas características mecânicas permitem a utilização de elementos estruturais mais esbeltos, ou seja, com menos volume, o que permite atingir estruturas mais leves. Esta é a principal razão pelo que este tipo de estruturas é normalmente denominada por estrutura leve.

Assim, correspondendo às expectativas, a estrutura A, em betão armado, mostra-se mais pesada, com maior volume e responsável pela utilização de uma maior quantidade de material, em comparação com a estrutura B, metálica.

3.8.2. Desempenho ambiental

A avaliação do desempenho ambiental das duas estruturas foi analisada em três categorias principais, onde foram considerados os parâmetros já descritos anteriormente.

COMPARAÇÃO	ER por m ²	ENR por m ²	CONSUMO DE ENERGIA por m ²
ESTRUTURA A	1,08E+01	1,44E+03	1,45E+03
ESTRUTURA B	1,25E+01	1,26E+03	1,27E+03
DIFERENÇA (%)	13,5%	12,7%	12,5%

Quadro V - Comparação dos impactos ambientais no consumo de energia das duas estruturas.

No que diz respeito aos impactos ambientais na categoria de consumo de energia, a estrutura A apresenta uma maior quantidade de energia consumida do que a estrutura B, em cerca de 12,5%. Também no balanço da energia não renovável incorporada, a estrutura A apresenta um resultado mais elevado, como é apresentado no quadro anterior. No entanto, no parâmetro de energia renovável incorporada, é a estrutura B que é responsável por um consumo maior, mas estes valores são significativamente mais reduzidos do que no parâmetro anterior, como se pode verificar no gráfico 8, sendo que por isso, no balanço do consumo total, é a estrutura A que se mostra responsável pela maior quantidade de energia consumida.

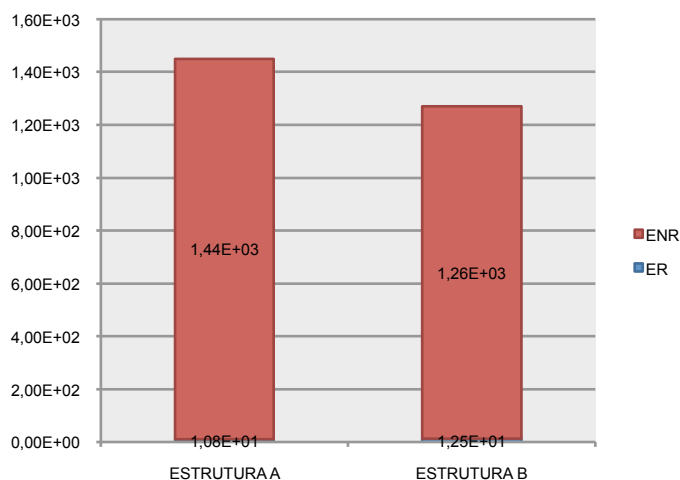


Gráfico 8 – Representação do desempenho das duas estruturas na categoria de consumo de energia.

Apesar da produção unitária de aço consumir mais energia (quadro I), quer de fontes renováveis como de fontes não renováveis, do que a produção unitária de betão, o resultado contraria esta condição, pois, tal como foi analisado anteriormente, a quantidade de material envolvido na produção da estrutura de betão armado é maior do que na produção da estrutura metálica. Esta condição é ainda reforçada pela interferência da introdução de armaduras de aço na estrutura de betão armado.

COMPARAÇÃO	GWP por m ²	ODP por m ²	AP por m ²	EP por m ²	POCP por m ²
ESTRUTURA A	1,54E+02	5,51E-06	3,39E-01	6,43E-02	2,80E-02
ESTRUTURA B	1,28E+02	6,18E-06	3,57E-01	6,19E-02	2,43E-02
DIFERENÇA (%)	16,8%	10,9%	5,0%	3,7%	13,3%

Quadro VI - Comparação dos impactos ambientais na categoria de emissões atmosféricas das duas estruturas.

O desempenho ambiental na categoria de emissões atmosféricas das duas estruturas não mostra com evidência um material com melhor desempenho, pois no que diz respeito ao potencial de destruição do ozono (ODP) e ao potencial de acidificação (AP), a estrutura B apresenta pior desempenho do que a estrutura A, enquanto que nos outros três parâmetros, potencial de aquecimento global (GWP), potencial de eutrofização (EP) e potencial de formação de ozono troposférico (POCP), é a estrutura A que tem o pior desempenho. No quadro anterior, podemos ainda observar que as diferenças entre os resultados em todos os parâmetros são pouco significativas, sendo que é possível concluir que a percentagem da diferença entre os dois valores varia entre 4% e 17%.

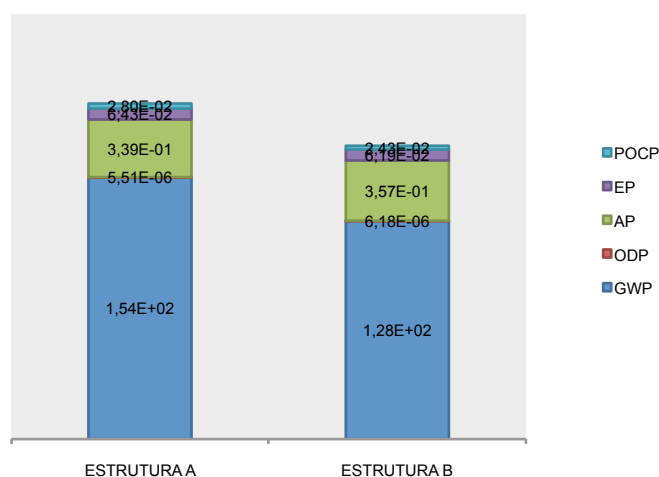


Gráfico 9 - Representação do desempenho das duas estruturas na categoria de emissões atmosféricas.

Observando o gráfico 9, podemos concluir que, apesar das diferenças entre as estruturas, no que diz respeito à quantidade de material utilizado bem como aos processos de produção envolvidos, o impacto ambiental de emissões atmosféricas das duas estruturas é muito semelhante, sendo que a estrutura A tem pior desempenho, principalmente pela contribuição do parâmetro de potencial de aquecimento global.

COMPARAÇÃO	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos	Energia não Renovável incorporada
ESTRUTURA A	5,89E-01	1,44E+03
ESTRUTURA B	5,66E-01	8,29E+02
DIFERENÇA (%)	3,8%	42,4%

Quadro VII - Comparação dos impactos ambientais na categoria de esgotamento de recursos das duas estruturas.

O desempenho ambiental das estruturas no parâmetro do potencial de esgotamento de recursos abióticos é muito semelhante, tal como podemos observar no quadro anterior, apresentando uma diferença de 3,8%, com um resultado superior para a estrutura A. No entanto, no que diz respeito à energia não renovável incorporada, a diferença entre as duas estruturas é significativa, sendo que a estrutura A apresenta um resultado 42,4% maior do que o resultado da estrutura B.

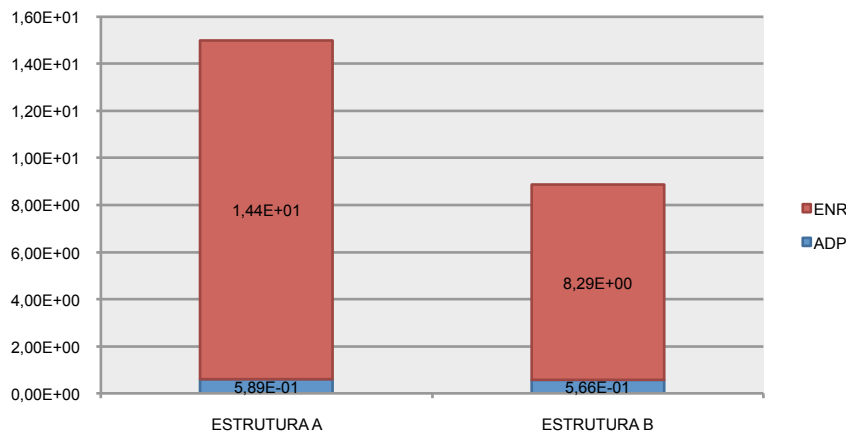


Gráfico 10 - Representação do desempenho das duas estruturas na categoria de esgotamento de recursos.

Para calcular o desempenho ambiental das duas estruturas, foi necessário normalizar os valores de cada parâmetro, de maneira a poder comparar valores com a mesma unidade. Para tal, foi utilizada uma estrutura como prática convencional e uma como melhor prática, em que na pontuação resultante, o 0 corresponde à prática convencional, e o 1 à melhor prática. Os valores de impacto ambiental da estrutura de referência foram conseguidos através da utilização de valores de impactos ambientais do

betão armado, apresentados na mesma base de dados utilizada no caso de estudo, assumindo-a como estrutura simples e determinada através de valores médios. Por esta razão, apresenta valores distintos dos apresentados na estrutura A. No entanto, para utilizar um exemplo com uma estrutura semelhante, foi considerado o peso global da estrutura A. É importante referir que, depois de ponderados, quanto maior for o valor resultante, melhor é o desempenho, ao contrário do que acontecia nos valores dos impactos.

ESTRUTURA A	CATEGORIA	PARÂMETRO	ESTR. REF.	PRÁTICA CONVENCIONAL	MELHOR PRÁTICA	ESTRUTURA A	ESTRUTURA A NORMALIZADA	PESO DO PARÂMETRO	PONTUAÇÃO
IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO DE ENERGIA	ER + ENR	1,25E+00	1,42E+03	3,56E+02	1,45E+03	-0,02	100%	-0,02
		Total						100%	-0,02
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	GWP	1,48E-01	1,69E+02	4,23E+01	1,54E+02	0,12	20%	0,02
		ODP	3,55E-09	4,05E-06	1,01E-06	5,51E-06	-0,48	20%	-0,10
		AP	5,56E-04	6,35E-01	1,59E-01	3,39E-01	0,62	20%	0,12
		EP	5,76E-05	6,58E-02	1,64E-02	6,43E-02	0,03	20%	0,01
		POCP	5,28E-05	6,03E-02	1,51E-02	2,80E-02	0,71	20%	0,14
		Total						100%	0,20
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	ADP	6,08E-04	6,94E-01	1,74E-01	5,89E-01	0,20	50%	0,10
		ENR	1,24E+00	1,42E+03	3,54E+02	1,44E+03	-0,02	50%	-0,01
		Total						100%	0,09

Quadro VIII - Normalização e agregação dos impactos ambientais da estrutura A.

ESTRUTURA B	CATEGORIA	PARÂMETRO	ESTR. REF.	PRÁTICA CONVENCIONAL	MELHOR PRÁTICA	ESTRUTURA B	ESTRUTURA B NORMALIZADA	PESO DO PARÂMETRO	PONTUAÇÃO
IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO DE ENERGIA	ER + ENR	1,25E+00	1,42E+03	3,56E+02	1,27E+03	0,15	100%	0,15
		Estrutura B						100%	0,15
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	GWP	1,48E-01	1,69E+02	4,23E+01	1,28E+02	0,32	20%	0,06
		ODP	3,55E-09	4,05E-06	1,01E-06	6,18E-06	-0,70	20%	-0,14
		AP	5,56E-04	6,35E-01	1,59E-01	3,57E-01	0,58	20%	0,12
		EP	5,76E-05	6,58E-02	1,64E-02	6,19E-02	0,08	20%	0,02
		POCP	5,28E-05	6,03E-02	1,51E-02	2,43E-02	0,80	20%	0,16
		Estrutura B						100%	0,22
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	ADP	6,08E-04	6,94E-01	1,74E-01	5,66E-01	0,25	50%	0,12
		ENR	1,24E+00	1,42E+03	3,54E+02	8,29E+02	0,55	50%	0,28
		Estrutura B						100%	0,40

Quadro IX - Normalização e agregação dos impactos ambientais da estrutura B.

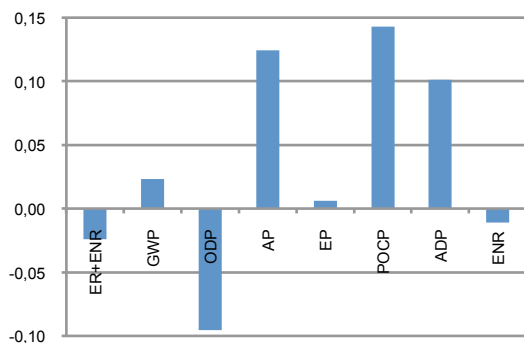


Gráfico 11 - Pontuação dos parâmetros da estrutura A

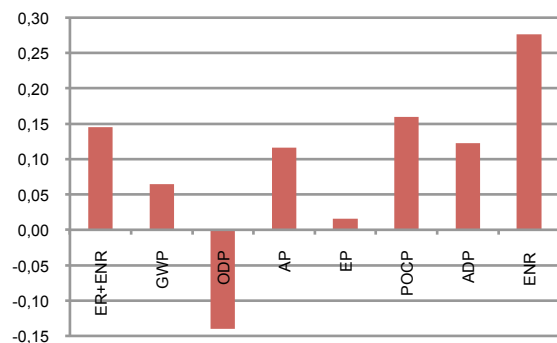


Gráfico 12 - Pontuação dos parâmetros da estrutura B

Foi determinada a pontuação individual de cada categoria de impactos ambientais, sendo por sua vez estes valores ponderados pela atribuição de pesos a cada categoria.

	ESTRUTURA A			ESTRUTURA B		
CATEGORIA	VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO	VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO
CONSUMO DE ENERGIA	-0,02	33,3%	-0,01	0,15	33,3%	0,05
EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	0,20	33,3%	0,067	0,22	33,3%	0,072
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	0,09	33,3%	0,03	0,40	33,3%	0,13
DESEMPENHO AMBIENTAL DAS ESTRUTURAS		100%	0,09		100%	0,25

Quadro X - Desempenho ambiental das estruturas. (Cenário 1)

É importante referir que a pontuação negativa atribuída à categoria de consumo de energia da estrutura A, significa que o seu desempenho é pior do que o da prática convencional. Sendo ambos os sistemas representativos de estruturas de betão armado, esta situação, bem como a diferença entre todos os valores obtidos, pode ter como justificação a quantidade de material considerada em cada uma, sendo que a estrutura A foi calculada com base num exemplo real, o que vem demonstrar que a utilização de valores de referência pode alterar a sua veracidade. Outra justificação possível passa por uma constituição diferente entre as duas estruturas, embora ambas sejam de betão armado, no sistema viga e pilar, podem ser desenhadas de maneira diferente, dando origem a valores distintos na respectiva análise de impactos ambientais.

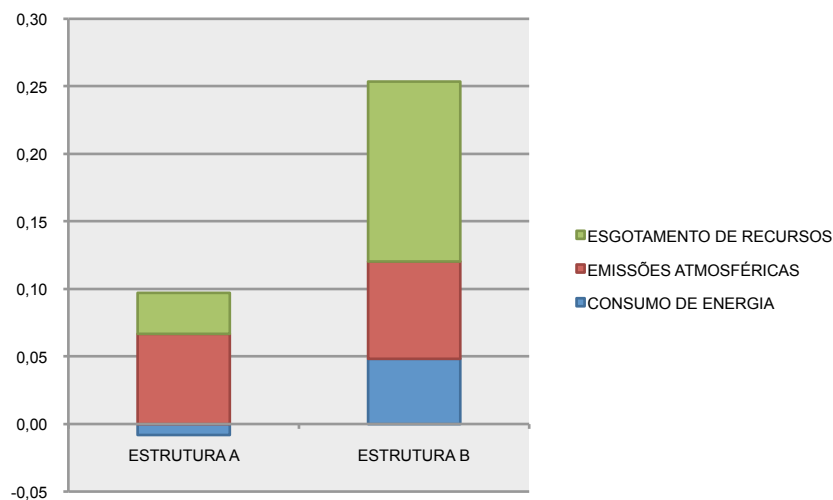


Gráfico 13 - Desempenho das categorias ambientais das duas estruturas. (Cenário 1)

Comparando as pontuações individuais de cada categoria, podemos concluir que a estrutura B tem melhor pontuação nos três indicadores, sendo que na categoria de emissões atmosféricas, a pontuação é muito semelhante.

Considerando uma atribuição equitativa da importância relativa das categorias, a pontuação final obtida no desempenho ambiental de cada estrutura reflete naturalmente o melhor desempenho da estrutura B em relação à A, tal como nas categorias individuais. Se fossem consideradas as classificações de avaliação da metodologia SBTool^{PT}-H (Bragança e Mateus, 2009), a pontuação obtida pela estrutura A seria D e a estrutura B seria classificada com um C.

Procurando promover uma análise de sensibilidade, foram criados mais dois cenários, alterando os pesos atribuídos a cada categoria, aumentando a importância relativa da categoria de emissões atmosféricas (categoria em que a estrutura A tem melhor pontuação) para 50% e as outras duas com 25%, no cenário 2, e para 70% e 15%, no cenário 3.

CATEGORIA	ESTRUTURA A			ESTRUTURA B		
	VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO	VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO
CONSUMO DE ENERGIA	-0,02	25%	-0,01	0,15	25%	0,04
EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	0,20	50%	0,100	0,22	50%	0,108
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	0,09	25%	0,02	0,40	25%	0,10
DESEMPENHO AMBIENTAL DAS ESTRUTURAS		100%	0,12		100%	0,24

Quadro XI - Desempenho ambiental das duas estruturas. (Cenário 2)

CATEGORIA	ESTRUTURA A			ESTRUTURA B		
	VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO	VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO
CONSUMO DE ENERGIA	-0,02	15%	-0,004	0,15	15%	0,022
EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	0,20	70%	0,141	0,22	70%	0,151
ESGOTAMENTO DE RECURSOS	0,09	15%	0,014	0,40	15%	0,060
DESEMPENHO AMBIENTAL DAS ESTRUTURAS		100%	0,15		100%	0,23

Quadro XII - Desempenho ambiental das duas estruturas (Cenário 3)

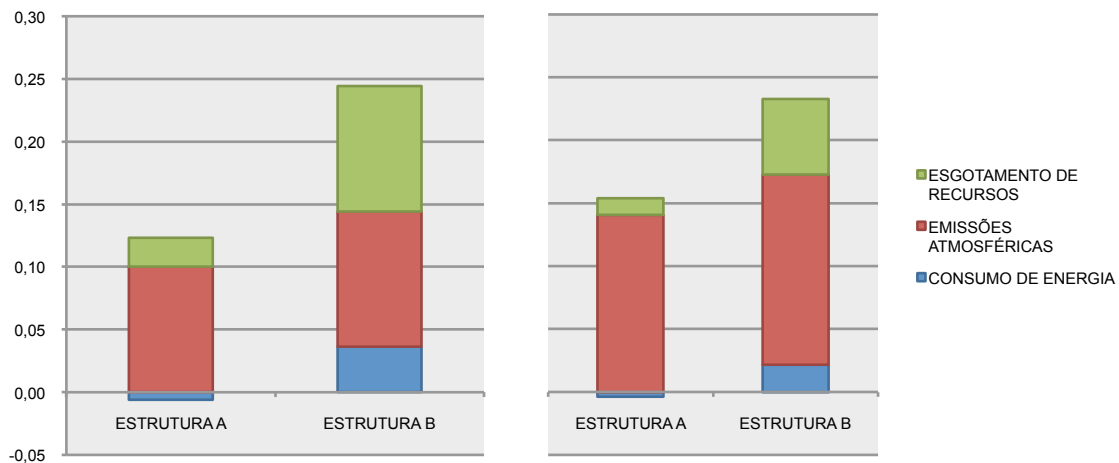


Gráfico 14 - Desempenho das categorias ambientais das duas estruturas. (Cenário 2)

Gráfico 15 - Desempenho das categorias ambientais das duas estruturas. (Cenário 3)

Como a estrutura B tem uma pontuação individual em cada categoria superior à estrutura A, qual que seja a importância relativa atribuída às categorias, o balanço final terá sempre o mesmo resultado, tendo como vencedor a estrutura B. Ainda assim, como era expectável, o aumento da importância relativa da categoria de emissões atmosféricas, onde a estrutura A tem a sua pontuação mais elevada, promove uma aproximação das pontuações globais do desempenho ambiental das duas estruturas.

3.8.3. Desempenho económico

Tendo como base a publicação *Informação sobre custos na Construção* (Fonseca, 2007), foram contabilizados os custos associados a cada material utilizado nas duas estruturas. Apenas no caso dos materiais da laje térrea, a informação disponível na publicação não se mostrou suficiente, pelo que se optou pela informação presente no orçamento apresentado no processo de concurso do edifício original. Desta forma, a informação utilizada neste capítulo não é baseada nas mesmas fontes, tendo por isso implicações na veracidade dos resultados finais. No entanto, como o elemento laje térrea é semelhante nas duas soluções, não é introduzida informação estranha na comparação entre estruturas, sendo que desta forma o estudo não fica comprometido. O facto de assumir uma mesma base de dados para a avaliação económica de todos os elementos constituintes das duas estruturas permite que, apesar do risco de não serem reais, os valores assumidos são equivalentes entre si, ou seja, têm os mesmos erros implícitos. Por esta razão, não foi introduzido neste capítulo informação sobre custos de materiais provenientes de empresas reais, pois os valores que se assumiriam não teriam a mesma base de cálculo. Pela mesma razão, a informação cedida pelo orçamento não foi

considerada, com exceção da laje térrea, pois implicaria que o orçamento para a estrutura B fosse baseado noutros pressupostos, podendo afectar a equidade de comparação entre as duas estruturas.

	TOTAL BETÃO	TOTAL BETÃO por m ²	TOTAL AÇO EM VARÃO	TOTAL AÇO EM VARÃO por m ²	TOTAL AÇO EM PERFIL	TOTAL AÇO EM PERFIL por m ²	TOTAL PAV. TERREO	TOTAL PAV. TERREO por m ²	TOTAL COFRAGEM	TOTAL COFRAGEM por m ²	TOTAL	TOTAL por m ²
ESTRUTURA A	12420,12	26,20	14361,97	30,30	0,00	0,00	13689,76	28,88	25348,97	53,48	65820,82	138,86
ESTRUTURA B	6815,44	14,38	6308,74	13,31	102898,65	217,09	13689,76	28,88	5966,67	12,59	135679,27	286,24
DIFERENÇA (%)	45,1%		56,1%		100,0%		0,0%		76,5%		51,5%	

Quadro XIII - Custo de construção das duas estruturas.

Os custos totais de construção de cada estrutura são constituídos pelos custos diretos, associados ao material, equipamento e mão de obra e os custos indiretos, onde se acrescenta o valor de lucro atribuído. Sendo apresentados na mesma unidade, €/estrutura e €/m², podemos assumir o somatório de todos os valores. Assim, a estrutura B apresenta um custo de construção 51,5% superior ao da estrutura A. Esta significativa diferença está diretamente relacionada com o custo de material dos perfis metálicos e da mão de obra associada, como podemos ver mais à frente.

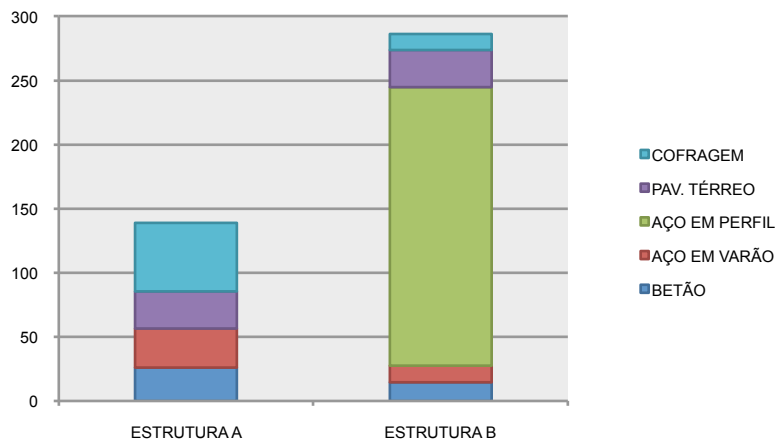


Gráfico 16 - Custo por m² das operações associadas aos materiais utilizados nas duas estruturas.

Como podemos observar no gráfico, é o custo associado à cofragem dos elementos de betão armado que apresenta maior impacto no custo total da estrutura A. Na estrutura B, é o custo associado à construção dos perfis metálicos que tem maior impacto no custo total da estrutura e é o maior responsável pelo desempenho económico negativo desta estrutura.

No desempenho económico das duas estruturas, podemos ainda analisar os custos diretos isolados. O material, o equipamento e a mão de obra são indicadores já

contabilizados no parâmetro de custos de construção, mas torna-se interessante entender a relação entre as duas estruturas no que diz respeito a estes parâmetros.

		TOTAL BETÃO	TOTAL BETÃO por m ²	TOTAL AÇO EM VARÃO	TOTAL AÇO EM VARÃO por m ²	TOTAL AÇO EM PERFIL	TOTAL AÇO EM PERFIL por m ²	TOTAL COFRAGEM	TOTAL COFRAGEM por m ²	TOTAL	TOTAL por m ²
MATERIAL	ESTRUTURA A	5796,32	12,23	6367,51	13,43	0,00	0,00	3972,17	8,38	16136,00	34,04
	ESTRUTURA B	3209,98	6,77	2797,04	5,90	28965,56	61,11	1531,55	3,23	36504,13	77,01
	DIFERENÇA (%)	44,6%		56,1%		100,0%		61,4%		55,8%	
EQUIPAMENTO	ESTRUTURA A	255,62	0,54	434,15	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	689,77	1,46
	ESTRUTURA B	144,09	0,30	190,71	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	334,80	0,71
	DIFERENÇA (%)	43,6%		56,1%		0,0%		0,0%		51,5%	
MÃO-DE-OBRA	ESTRUTURA A	4403,00	9,29	5258,02	11,09	0,00	0,00	17366,85	36,64	27027,87	57,02
	ESTRUTURA B	2383,13	5,03	2309,67	4,87	37043,49	78,15	3491,81	7,37	45228,10	95,42
	DIFERENÇA (%)	45,9%		56,1%		100,0%		79,9%		40,2%	

Quadro XIV - Custo de material, equipamento e mão-de-obra das duas estruturas.

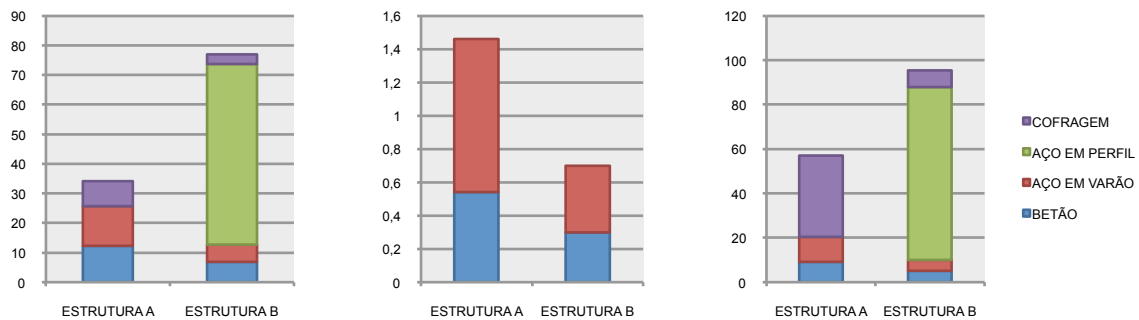


Gráfico 17 - Custo de material, equipamento e mão-de-obra por m² nas duas estruturas.

Como podemos observar no quadro anterior, a estrutura B apresenta um custo total de material superior ao da estrutura A, com uma diferença significativa de cerca de 55%. Desta forma, podemos concluir que os elementos principais da estrutura metálica, os perfis em aço para pilares e vigas, são significativamente mais dispendiosos do que os mesmos elementos em betão armado, tendo consciência que o resto da estrutura é semelhante entre os dois casos de estudo. A sublinhar este factor, encontra-se a diferença significativa de quantidade de material, com um maior peso para a estrutura A, como vimos anteriormente. Assim, o custo de material relacionado com os elementos metálicos é muito superior ao dos elementos em betão armado.

No que diz respeito ao custo associado ao equipamento disponibilizado em obra para a construção da estrutura, a estrutura A mostra-se bastante superior, tendo em

consideração que não são necessários equipamentos para a construção do sistema com perfis metálicos, fazendo com que os custos associados à estrutura B apenas estejam relacionados com os elementos em betão armado que a constituem. Também no que diz respeito aos equipamentos implícitos na utilização de cofragens, a publicação do LNEC (Fonseca, 2009) não associa custos. Assim, podemos assumir que a estrutura A tem implícitos custos de equipamento mais elevados do que a estrutura B, em cerca de 51%.

Na análise do custo associado à mão de obra, podemos concluir que os elementos que implicam um maior investimento em mão de obra são os perfis metálicos e as cofragens (consideradas em duas fases: cofragem e descofragem). Também o trabalho em betão e aço em varão, principalmente na estrutura A, têm significado, sendo que no balanço final, o maior investimento prende-se com os elementos de aço em perfil. Assim, é a estrutura B que apresenta um custo mais elevado associado à necessidade de mão de obra, numa diferença de cerca de 40%.

A avaliação do desempenho económico das estruturas em estudo teve por base o custo de construção, que engloba o custo dos materiais, dos equipamentos e da mão de obra, como vimos anteriormente. Ainda que, no que diz respeito ao custo dos equipamentos seja a estrutura A a apresentar um custo significativamente maior, no balanço final a estrutura B apresenta um investimento económico global mais elevado, sendo praticamente o dobro do apresentado pela estrutura A.

O valor do custo total de construção têm em consideração o custo da montagem das estruturas, com o equipamento e a mão de obra, mas também o custo da fase de extração de matéria-prima e fabricação dos elementos estruturais, associado ao valor apresentado no custo dos materiais. É importante salientar que neste custo, que aparece como um valor médio, integrado no contexto nacional da época de publicação da base de dados, existe possivelmente uma margem de lucro associado aos intervenientes na comercialização dos respectivos produtos, sendo por isso difícil distinguir o que é realmente o custo da fase de extração e fabricação de cada elemento. No entanto, tendo em consideração os resultados apresentados pelas duas estruturas, bem como a quantidade de material que cada uma representa, podemos concluir que os elementos em aço têm um peso significativo na custo de uma estrutura metálica.

Para ser possível comparar os resultados do desempenho ambiental e do desempenho económico foi feita a normalização dos valores e a agregação dos resultados, utilizando o mesmo método que foi aplicado aos resultados do desempenho ambiental. Tal como já foi referenciado no capítulo 3.5.2, foram utilizados os valores médios de construção

por m² apresentados no Inquérito à Avaliação Bancária, do INE. Não sendo consensual a importância relativa do custo da estrutura, foram consideradas três percentagens diferentes, sendo consequentemente realizada uma análise de sensibilidade dos resultados consoante os valores utilizados.

	100%	Cenário 1 - 20%	Cenário 2 - 15%	Cenário 3 - 10
Média do custo por m ² de área útil do quartil com as avaliações mais baixas - MELHOR PRÁTICA	687	137,4	103,05	68,7
Média global do custo por m ² de área útil - PRÁTICA CONVENCIONAL	1113	222,6	166,95	111,3

Quadro XV - Definição dos valores de melhor prática e prática convencional nos vários cenários (www.ine.pt).

Utilizando os valores de custo por m² da melhor prática e prática convencional, foram realizados 3 cenários distintos, consoante a percentagem de custos atribuída à estrutura. Seguindo as indicações da metodologia SBTTool^{PT}-H (Bragança e Mateus, 2009), optou-se por não assumir valores inferiores a -0,20, de maneira a evitar distorções na agregação dos parâmetros. Por essa razão, no cenário 3, o desempenho económico das duas estruturas apresenta-se semelhante, apesar de terem valores diferentes.

CENÁRIO 1 20% DO CUSTO TOTAL	PRÁTICA CONVENCIONAL	MELHOR PRÁTICA	CUSTO CALCULADO	VALOR NORMALIZADO
ESTRUTURA A	222,6	137,4	138,86	0,98
ESTRUTURA B	222,6	137,4	286,24	-0,20
CENÁRIO 2 15% DO CUSTO TOTAL	PRÁTICA CONVENCIONAL	MELHOR PRÁTICA	CUSTO CALCULADO	VALOR NORMALIZADO
ESTRUTURA A	166,95	103,05	138,86	0,44
ESTRUTURA B	166,95	103,05	286,24	-0,20
CENÁRIO 3 10% DO CUSTO TOTAL	PRÁTICA CONVENCIONAL	MELHOR PRÁTICA	CUSTO CALCULADO	VALOR NORMALIZADO
ESTRUTURA A	111,3	68,7	138,86	-0,20
ESTRUTURA B	111,3	68,7	286,24	-0,20

Quadro XVI - Desempenho económico das duas estruturas em 3 cenários, consoante a percentagem de custo da estrutura no custo total da obra.

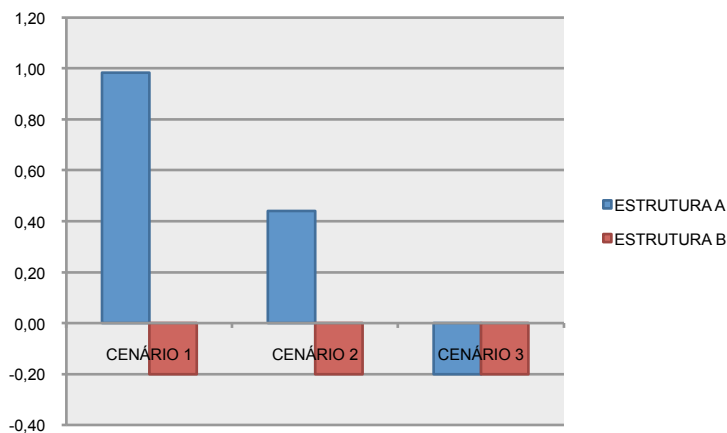


Gráfico 18 - Desempenho económico das duas estruturas nos três cenários considerados.

Como era de esperar, a estrutura A mantém-se com melhor desempenho, em relação à estrutura B, com exceção do cenário 3, onde as duas estruturas tem o mesmo desempenho. A estrutura B mantém um pontuação negativa em todos os cenários, o que significa que nos três casos tem um desempenho pior do que o da pior prática. Como os valores utilizados como referência não são completamente adequados ao contexto que se apresenta neste estudo, como já foi explicado, o facto de surgirem valores negativos não implica que as estruturas tenham necessariamente um desempenho negativo. O que é mais importante salientar destes resultados é a relação entre os valores das duas estruturas, de maneira a poder compará-las em conjunto com o desempenho ambiental. Por essa razão, o cenário 3 deixa de ter relevância no estudo, por apresentar os mesmos valores, apesar dos desempenhos serem diferentes.

3.8.4. Desempenho social

Um dos factores mais relevantes no que diz respeito ao desempenho social de uma estrutura está relacionado com a segurança física que oferece aos habitantes/utilizadores dos edifícios. Neste contexto, as estruturas em betão armado têm a seu favor o comportamento de resistência ao fogo associado ao betão, sendo que se apresentam mais resistentes do que as estruturas de aço. Tal como foi referido anteriormente, a exposição dos elementos metálicos a temperaturas progressivamente crescentes provoca uma redução significativa na sua capacidade resistente e na sua rigidez, que pode levar ao colapso da estrutura, quando atingida a temperatura crítica do material. Esta característica obriga a aplicação de proteção especial dos elementos contra o fogo nos elementos metálicos.

No que diz respeito ao comportamento destas estruturas em situações de terramoto e ventos extremos, a ductilidade dos materiais mostra-se essencial na resposta a estas situações, por representar o grau de deformação que o material suporta até a sua fractura. Tanto o aço, como o betão, principalmente porque é reforçado por armaduras de aço, têm bom desempenho quando sujeitos a movimento fortes e repentinos, sendo que as conexões dos elementos têm uma significativa importância. Ainda assim, o aço mostra o melhor desempenho pois permite que as estruturas abanem sem quebrarem, tal como se pode observar em pontes, por exemplo.

Por fim, no que diz respeito à segurança dos ocupantes, é importante referir a durabilidade das estruturas, consequente da utilização de cada material. Assim, as estruturas em betão apresentam um melhor desempenho no que se refere à durabilidade, sendo que as estruturas de aço apresentam efeitos negativos com a passagem do tempo. A

degradação dos elementos de aço é mais evidente ao longo dos anos, com efeitos que resultam de alterações de temperaturas ou como resposta à humidade, e que exigem operações de manutenção mais intensas. Para o mesmo período de tempo, as estruturas de aço necessitam de uma maior manutenção do que as estrutura de betão, que mantém as suas principais características por mais tempo.

O conforto térmico de um espaço é resultado do comportamento de todos os materiais que fazem a fronteira com o exterior, sendo que por essa razão, a estrutura pode não ter o papel principal, cabendo aos elementos da envolvente, como a fachada ou a cobertura, a maior parte da área de contacto entre o interior e exterior. Neste aspecto, os vãos envidraçados têm normalmente um grande impacto no comportamento térmico do sistema da envolvente. No entanto, os elementos estruturais participam também neste contexto, tanto em situações em que constituem a fachada, como paredes portantes ou coberturas, ou em situações em que participam pontualmente dela, como em pilares. As propriedades térmicas de um material estão relacionadas com a combinação de três factores: a densidade, a condutividade e capacidade de armazenar o calor (Cement & Concrete Institute, 2011). Neste contexto, o betão tem um desempenho muito positivo na eficiência térmica dos espaços devido à sua massa térmica, que permite reter o calor. Desta forma, a utilização do betão, tendo em consideração a sua espessura de maneira a tirar partido da sua massa térmica, tem efeitos no conforto dos ocupantes bem como no consumo energético necessário para manter a temperatura interior conveniente.

Building Material	Density (kg/m ³)	Thermal Conductivity (W/m.K)	Specific Heat Capacity (J/kg.K)	Effective Thermal Mass
Timber	500	0.13	1 600	Low
Steel	7 800	50	450	Low
Concrete	2 400	1.75	1 000	High
Brick	1 750	0.77	1 000	High

Figure 30 - Propriedades térmicas dos materiais de construção (Cement & Concrete Institute, 2011).

No que diz respeito à estrutura metálica, esta questão é mais delicada, pois a utilização de elementos em aço implica uma maior utilização de elementos específicos de isolamento. Também a relação deste tipo de estrutura com a utilização de grandes áreas de fachada envidraçadas leva a uma menor eficiência térmica, exigindo desta forma a utilização de sistemas adequados a melhorar o conforto térmico no interior dos espaços.

Quanto ao conforto acústico, o betão volta a surgir com um bom desempenho, pois a sua massa transforma-se numa barreira de som eficiente, bem como num amortecedor de

vibrações, no caso das lajes entre pisos (Cement & Concrete Institute, 2011). Quanto ao aço, o conforto acústico apenas é atingido com o auxílio de sistemas de revestimento adequados.

A fase de construção de um edifício tem implicações significativas no local da obra, pois implica um grande movimento de máquinas e material, bem como um elevado número de trabalhadores. Como resultado dos trabalhos necessários para erguer um edifício, surge a produção de desperdícios, emissões atmosféricas e barulho, que naturalmente prejudicam a área envolvente ao local de obra. No entanto, questões como a redução do tempo necessário de obra, do movimento de terras ou dos trabalhos executados no local são questões que permitem melhorar o desempenho social de um edifício, em que a escolha dos materiais tem naturalmente influência.

O potencial de reciclagem e reutilização surge aqui como uma característica de desempenho social, ainda que esteja claramente relacionada com o comportamento ambiental do conjunto. Neste contexto, o potencial de reciclagem e reutilização tem relação com a minimização da repetição de trabalhos e operações, minimizando os desperdícios e emissões no local da obra. Neste parâmetro, o aço apresenta o melhor comportamento pois tem um potencial de reciclagem e/ou reutilização de 99% (Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012). Este comportamento promove também a desmontagem que permite a diminuição de operação, diminuição de produção de resíduos sólidos e emissões, além de acelerar o processo de fim de vida. O betão, ainda que permita a sua reciclagem e até reutilização, não apresenta uma taxa tão elevada de sucesso nesta área.

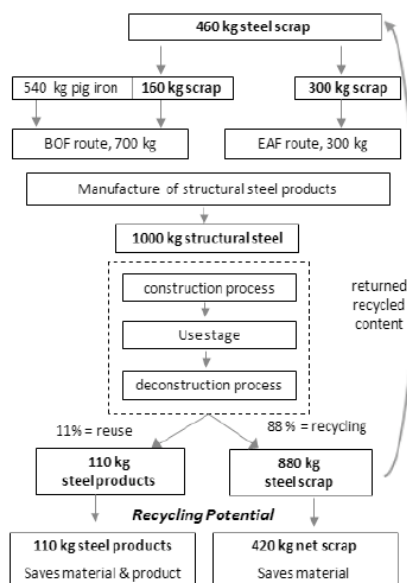


Figure 31 - Esquema do processo de reciclagem do aço (Siebers, Hubauer, Lange e Hauke, 2012).

A pré-fabricação de elementos implementa vantagens no processo de produção, como o rigor ou minimização de desperdícios, tal como já foi referido, e no processo de construção, sendo que retira do local da obra parte dos trabalhos, minimizando assim desperdícios e poluição sonora, e promovendo maior rapidez na fase de construção. Sendo que também são utilizados elementos pré-fabricados em betão, este processo é mais significativo em estrutura metálicas.

Assim, o processo de construção da estrutura em aço é mais rápido, com menor movimento de equipamentos e desperdícios, promovendo desta forma uma melhor relação com a área envolvente do local da obra. Na estrutura em betão, é mais comum a mistura e produção do material em obra, obrigando a um maior número de trabalhadores e equipamento e um maior período de secagem e consolidação dos elementos. Entre outras questões, a construção da estrutura em betão implica uma maior produção de desperdícios, tendo em consideração a sua produção no local e a aplicação do material.

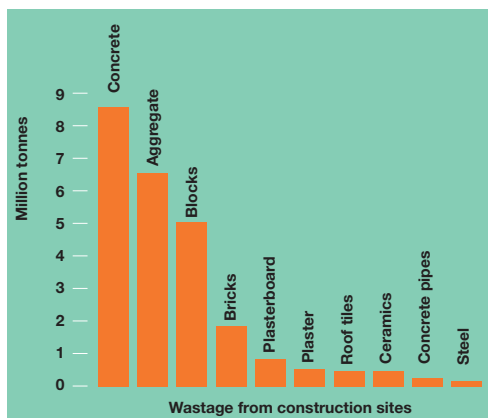


Figure 32 - Produção de desperdícios da utilização dos materiais de construção (fonte: <http://www.corusconstruction.com>).

Desta forma, é a estrutura em aço que apresenta um melhor desempenho social, no que diz respeito ao potencial de reciclagem e reutilização, ao período de construção e à gestão de desperdícios em obra.

Quando se pensa na arquitetura associada a cada uma das estruturas, pode-se assumir que a estrutura de betão promove uma plasticidade de formas que a estrutura de aço não permite, pelo rigor imposto pelos seus elementos. As características mecânicas e físicas de cada material influenciam o desenho arquitectónico, pelas infinitas possibilidades que promovem. No entanto, é difícil definir um melhor ou pior desempenho de cada material neste contexto (Castro, 2008).

Se o betão permite uma grande variedade de formas, pela sua trabalhabilidade, muitas vezes explorada em edifícios icónicos, como museus, mas também em simples edifícios de habitação, a estrutura de aço permite atingir grandes vãos, favoráveis para

edifícios que necessitem espaços interiores de grandes dimensões, como fábricas ou estações de comboio. Também à estrutura de aço se associa a modelação e repetição de elementos, como edifícios de escritórios, ou a construção em altura, como os arranha-céus, onde a estrutura mais leve permite atingir cotas mais elevadas.

Ainda que sejam o resultado das suas principais características, estas relações entre a função do edifício e a sua estrutura não são imperativas, pelo que ao longo da história da arquitetura, pudemos assistir à utilização de cada um destes materiais em funções diferentes da que os associamos. O edifício de habitação do arquiteto Mies Van Der Rohe, Farnsworth, é um exemplo da exploração do desenho do elemento estrutural em aço, atingindo uma sensibilidade arquitectónica que se afasta da pré-fabricação relacionada com este material (Castro, 2008).

Sobre o desempenho social destes materiais, no que diz respeito à qualidade arquitectónica, torna-se difícil definir qual o melhor desempenho, principalmente pela grande variedade de possibilidades que cada uma delas permite consoante a exploração das características de cada material. Ainda assim, a liberdade de formas que é associada à utilização do betão é contrariada pelo rigor e consequente qualidade de execução das estruturas metálicas.

Assumindo a avaliação qualitativa para cada um dos parâmetros apresentados, na relação direta entre o comportamento dos dois exemplos, o quadro seguinte apresenta o resumo dos resultados de cada estrutura, em que o sinal (+) representa o melhor desempenho, o sinal (–) o pior desempenho e o sinal (=) para situações de empate.

DESEMPENHO SOCIAL		BETÃO	AÇO	BALANÇO DE CADA CATEGORIA
SEGURANÇA DA ESTRUTURA	RESISTÊNCIA AO FOGO	+	-	BETÃO
	DUCTILIDADE	-	+	
	DURABILIDADE	+	-	
CONFORTO E SAÚDE	CONFORTO TÉRMICO	+	-	BETÃO
	CONFORTO ACÚSTICO	+	-	
PLANEAMENTO DE CONSTRUÇÃO	POTENCIAL DE RECICLAGEM	-	+	AÇO
	TEMPO DE CONSTRUÇÃO	-	+	
	GESTÃO DE DESPERDÍCIOS	-	+	
QUALIDADE ARQUITECTÓNICA	TRABALHABILIDADE	+	-	EMPATE
	RIGOR	-	+	
BALANÇO DESEMPENHO SOCIAL		5(+) 5(-)	5(+); 5(-)	EMPATE

Quadro XVII - Desempenho social das duas estruturas.

O balanço do desempenho social das estruturas é feito através do somatório dos melhores e dos piores resultados, na comparação direta do comportamento de cada

estrutura em cada um dos 10 parâmetros considerados, atribuindo a mesma importância relativa a cada um. Assim, o resultado desta análise permite definir como semelhante o comportamento das duas estruturas. Ainda assim, é possível admitir que o betão apresenta um melhor comportamento em duas categorias, sendo a segurança da estrutura e o conforto e saúde. O aço apresenta melhor comportamento na categoria de planeamento de construção. No que diz respeito à qualidade arquitectónica proporcionada pela utilização de cada tipo de estrutura, os comportamentos são equilibrados, sendo que cada uma responde melhor a cada um dos parâmetros.

É importante salientar, tal como já foi justificado, que esta avaliação é qualitativa e apenas tem em consideração os comportamentos de cada estrutura em comparação entre elas, e não isoladamente. Assim, estes resultados apenas devem ser considerados neste contexto.

3.9. Interpretação de resultados

Para responder ao objetivo deste estudo, saber qual o material estrutural mais sustentável, entre o betão e o aço, é necessário fazer um balanço entre as três principais áreas que definem o desempenho sustentável: ambiental, económica e social. A comparação entre os dois materiais pode ser feita, em primeiro lugar, parâmetro a parâmetro, procurando a relação direta entre os resultados obtidos, como já foi feito ao longo da análise dos resultados. Desta forma, consegue-se identificar o produto com melhor desempenho naquele parâmetro específico, com o mesmo rigor com que foram atribuídos os valores considerados nesse parâmetro.

No entanto, a pretensão de encontrar o melhor desempenho sustentável implica que se faça a avaliação no seu conjunto, exigindo que a agregação dos valores seja feita através da atribuição de importâncias relativas, primeiro a cada parâmetro e depois a cada categoria. É necessário fazer a normalização dos valores nas áreas de estudo, sendo que não foi possível fazer essa normalização na dimensão social, devido à sua análise qualitativa. Assim, a determinação da relação entre as três dimensões só pode ser feita qualitativamente, onde podemos assumir o melhor e pior desempenho em cada uma das três áreas, tal como está descrito no quadro seguinte. O sinal (+) representa o melhor desempenho, o sinal (–) o pior desempenho e o sinal (=) o empate entre as duas estruturas.

DESEMPENHO SUSTENTÁVEL	ESTRUTURA A	ESTRUTURA B
AMBIENTAL	-	+
ECONÓMICO	+	-
SOCIAL	=	=
FINAL	=	=

Quadro XVIII - Desempenho sustentável qualitativo, tendo em consideração as três dimensões estudadas.

Com base nestes dados, temos de assumir qual o peso de cada área de estudo para definir qual o material com melhor desempenho global. Atribuindo uma valor equitativo da importância relativa de cada dimensão sustentável, podemos concluir que a estrutura em betão tem o mesmo comportamento sustentável que a estrutura metálica. Como o comportamento social é semelhante nas duas estruturas, podemos fazer uma análise simples de sensibilidade deste resultado ao variar o peso relativo das dimensões ambiental e económica. Assim, se for dado uma maior importância ao desempenho ambiental, a estrutura B passa a apresentar um desempenho mais sustentável. No entanto, se o

desempenho económico for mais relevante, é a estrutura A que se assume como mais sustentável.

Assumindo que as duas estruturas apresentam o mesmo desempenho social, e tendo em conta que este estudo apresenta a análise quantitativa nas outras duas dimensões, o comportamento global pode ser analisado através dos valores normalizados em cada uma das duas dimensões. Assim, tornou-se importante criar uma relação entre as diferenças dos resultados em cada dimensão. Desta forma, podemos entender qual o material com melhor comportamento no conjunto das duas dimensões.

Numa primeira análise, os valores ponderados que foram considerados para o desempenho ambiental das duas estruturas foram retirados do cenário 1, (Quadro X e Gráfico 13), onde as importâncias relativas dos parâmetros são semelhantes. Para o desempenho económico, foram selecionados os valores do cenário 1, (Quadro XV e Gráfico 18), que resultam da consideração do custo da estrutura em 20% do custo total do edifício. Tal como foi explicado na interpretação do desempenho económico das duas estruturas, não foram assumidos valores inferiores a -0,20, de maneira a não distorcer os resultados. Assim, foram analisados os resultados das duas dimensões da sustentabilidade, fazendo variar o peso relativo de cada uma, como mostram os quadros seguintes.

CENÁRIO 1	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,09	50%	0,04	0,54
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,98	50%	0,49	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,25	50%	0,13	-0,03
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	50%	-0,10	
CENÁRIO 2	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,09	75%	0,07	0,31
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,98	25%	0,25	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,25	75%	0,19	0,14
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	25%	-0,05	
CENÁRIO 3	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,09	90%	0,08	0,18
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,98	10%	0,08	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,25	90%	0,23	0,21
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	10%	-0,02	

Quadro XIX - Desempenho sustentável das duas estruturas, nos cenários 1, 2 e 3.

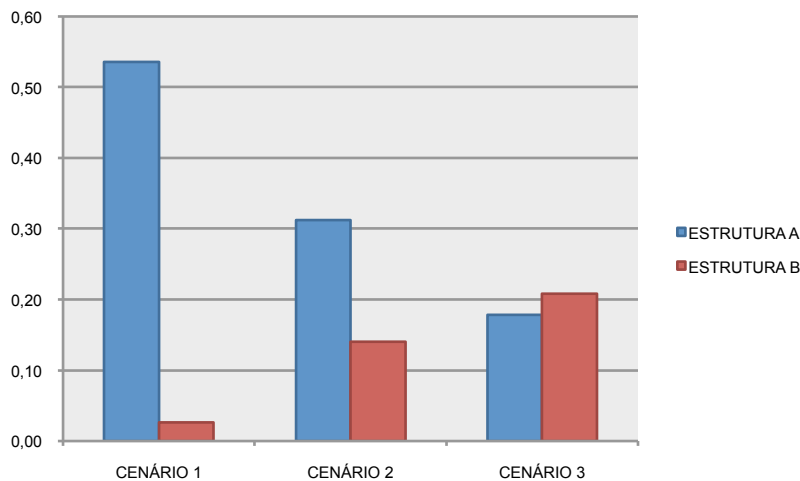


Gráfico 19 - Desempenho sustentável das duas estruturas, no cenário 1, 2 e 3.

Como primeira conclusão, os resultados mostram que a estrutura A tem melhor desempenho do que a estrutura B nos cenários 1 e 2, sendo que no primeiro os resultados são significativamente diferentes. O cenário 3 resulta da procura da relação percentual em que é possível considerar a estrutura B com melhor desempenho global, pelo que apenas quando se considera a dimensão ambiental com 90% e a dimensão económica com 10% se atinge esse resultado, sendo que esta relação de importância relativa se afasta claramente do conceito de construção sustentável.

De maneira a considerar outros cenários de desempenho sustentável, foram utilizados os mesmos pesos relativos para cada dimensão, utilizados nos cenários 1 e 2, mas foram considerados outros valores de desempenho ambiental e económico, também analisados anteriormente. Assim, foi considerado o cenário 2 do desempenho ambiental, em que a categoria de emissões atmosféricas assume 50% da importância relativa da dimensão ambiental (Quadro XI e Gráfico 14) e o cenário 2 do desempenho económico, que tem em conta o custo da estrutura como 15% do custo total do edifício (Quadro XV e Gráfico 18). Tal como aconteceu anteriormente, não foram considerados os valores inferiores a -0,20.

CENÁRIO 4	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,12	50%	0,06	0,28
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,44	50%	0,22	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,24	50%	0,12	0,02
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	50%	-0,10	
CENÁRIO 5	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,12	75%	0,09	0,20
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,44	25%	0,11	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,24	75%	0,18	0,13
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	25%	-0,05	
CENÁRIO 6	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,12	85%	0,11	0,17
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,44	15%	0,02	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,24	85%	0,23	0,18
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	15%	-0,03	

Quadro XX - Desempenho sustentável das duas estruturas, nos cenários 4, 5 e 6.

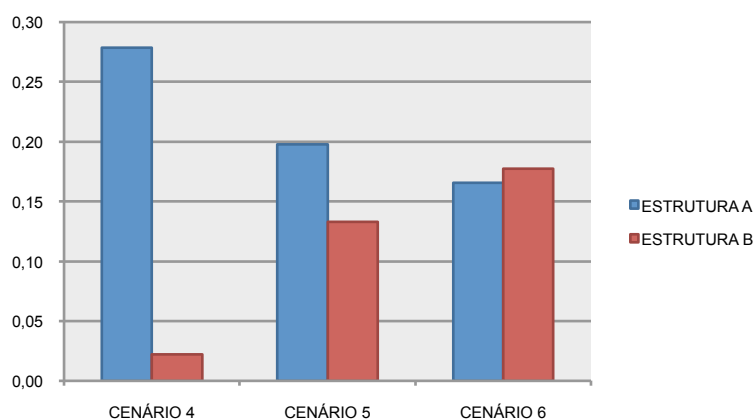


Gráfico 20 - Desempenho sustentável das duas estruturas, nos cenários 4, 5 e 6.

Também nos cenários 4 e 5, a estrutura A apresenta melhor desempenho sustentável do que a estrutura B. Tal como na análise anterior, no cenário 4, em que as dimensões têm a mesma importância relativa, a estrutura A mostra um desempenho sustentável significativamente superior ao da estrutura B. Alterando o peso das duas dimensões, os desempenhos das estruturas vão aproximando-se, sendo que ao assumir a dimensão ambiental com 85% do peso global, a estrutura B passa a apresentar melhor desempenho sustentável do que a estrutura A, como mostra o cenário 6.

De maneira a eleger o cenário mais adequado à realidade como resultado final deste trabalho, foi considerado o cenário 2 do desempenho ambiental, em que a categoria de emissões atmosféricas assume 50% do peso total, e as outras duas categorias com 25% cada, e o cenário 2 do desempenho económico, em que se considera que a estrutura ocupa 15% do custo total do edifício. No que diz respeito à distribuição da importância relativa de cada dimensão, foi eleito o cenário 4, analisado anteriormente, onde as dimensões ambiental e económica assumem o mesmo peso total do desempenho sustentável.

	DESEMPENHO AMBIENTAL	DESEMPENHO ECONÓMICO	DESEMPENHO SUSTENTÁVEL
ESTRUTURA A	0,06	0,22	0,28
ESTRUTURA B	0,12	-0,10	0,02

Quadro XXI – Resultado final do desempenho sustentável da estrutura A e estrutura B

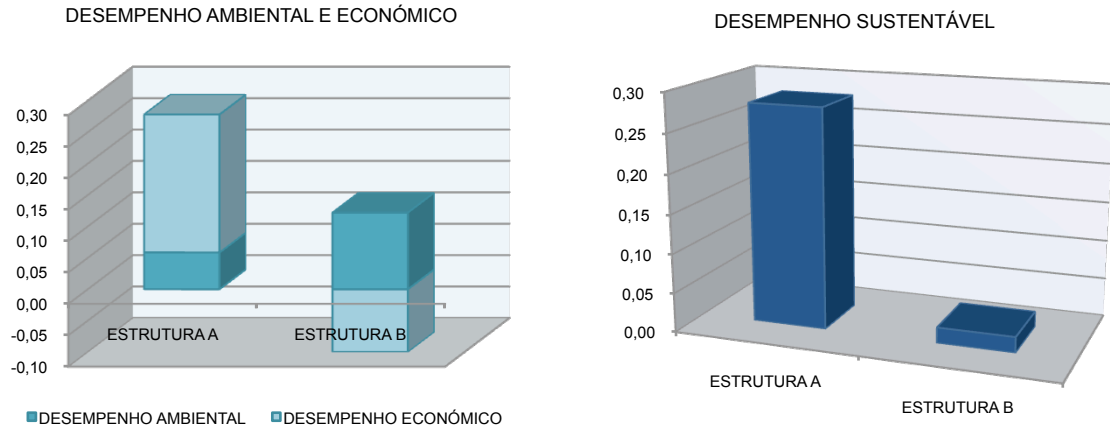


Gráfico 21 - Desempenho ambiental e económico das duas estruturas.

Gráfico 22 - Desempenho sustentável duas estruturas.

Assim, analisando os resultados obtidos, podemos afirmar que a estrutura A tem melhor desempenho sustentável do que a estrutura B, no conjunto das duas dimensões consideradas. Este resultado apenas pode ser considerado no contexto em que foi obtido, tendo consciência das opções que foram tomadas ao longo do trabalho.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Análise dos resultados dos estudos semelhantes

Tal como já foi referido anteriormente, a análise da sustentabilidade dos materiais, produtos e sistemas de construção é cada vez mais frequente e tem ocupado uma parte das investigações na área da sustentabilidade. A comparação entre sistemas estruturais com a mesma função e materiais diferentes é recorrente, e por isso torna-se interessante procurar estabelecer uma relação com os resultados obtidos neste estudo. É importante salientar que, como pudemos observar na descrição individual de cada estudo (capítulo 2.7), todos eles apresentam contextos e pressupostos diferentes, pelo que a utilização dos resultados para uma comparação global só pode ser feita com a consciência dessas diferenças.

De maneira a enquadrar o presente estudo com os estudos apresentados anteriormente, foi elaborado um quadro síntese das informações principais de cada estudo e dos respectivos resultados. Assim, é apresentada a unidade funcional, o objetivo principal, o método, os indicadores e os limites para cada estudo, bem como a conclusão final do material com melhor comportamento.

	UNIDADE FUNCIONAL	OBJECTIVO E ÂMBITO	MÉTODO	INDICADORES	LIMITES DE ESTUDO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	VENCEDOR
ESTUDO I (2001)	Sistema estrutural de edifício de escritórios com 4 pisos e 4600m ²	Comparação de duas soluções estruturais. Energia incorporada.	ATHENA	Energia incorporada	Cradle-to-gate + utilização	Resultados muito semelhantes para as duas estruturas	EMPATE
ESTUDO II (2002)	Sistema estrutural de edifício com três pisos e 2300m ²	Comparação entre dois sistemas estruturais. Desempenho ambiental.	ATHENA	Utilização de recursos, potencial de aquecimento, toxicidade do ar e água, desperdícios sólidos e energia incorporada	Cradle-to-gate + construção + transporte	Estrutura de betão tem menos impactos no aquecimento global, toxicidade, desperdícios sólidos e menor consumo de energia mas exige maior quantidade de recursos	BETÃO
ESTUDO III (Maio 2004)	Duas vigas com a mesma função estrutural	Comparação entre os dois elementos estruturais. Desempenho ambiental.	ATHENA	Utilização de recursos, potencial de aquecimento global, toxicidade da água e do ar, desperdícios sólidos e energia utilizada.	Cradle-to-gate	A viga de betão utiliza mais recursos, produz mais desperdícios e tem maior potencial de aquecimento global. Viga de aço tem maior potencial de toxicidade do ar e da água e utiliza maior quantidade de energia	BETÃO
ESTUDO IV (2004)	Pórtico de 4 pilares com uma viga contínua com 3 vãos	Comparação de duas soluções estruturais. Desempenho ambiental e económico.	LCA	Desempenho ambiental: consumo de energia e água, emissões de dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxido de azoto. Desempenho económico: custo final da estrutura.	Cradle-to-gate + transporte para o local da obra	Estrutura metálica consome mais energia e mais água e é responsável por mais emissões de dióxido de carbono e óxido de azoto. A estrutura em betão é responsável por mais emissões de dióxido de enxofre.	BETÃO

ESTUDO V (a) (Fevereiro 2006)	Ponte	Comparação da estrutura em betão com três estruturas de diferentes tipos de aço. Desempenho ambiental.	BEES	Consumo de água, smog, ozono, saúde, alteração do habitat, aquecimento global, combustíveis fósseis, eutrofização, toxicidade, poluentes do ar e acidificação	Cradle-to-gate	A estrutura em aço de alto forno tem pior desempenho do que a estrutura de betão em 23%. A estrutura em aço de forno de arco eléctrico tem melhor desempenho do que o betão em 31%. A solução mista tem um desempenho praticamente semelhante à estrutura em betão	AÇO (produzido em forno de arco eléctrico)
ESTUDO V (b) (Fevereiro 2006)	Sistema estrutural de edifício habitacional	Comparação entre das soluções estruturais. Desempenho ambiental e económico.	BEES	Consumo de água, smog, ozono, saúde, alteração de habitat, aquecimento global, combustíveis fósseis, eutrofização, toxicidade, poluentes do ar, acidificação e qualidade do ar interior; custos iniciais e custos de manutenção.	Desempenho ambiental: cradle-to-gate; Desempenho económico: cradle-to-gate + utilização	Desempenho ambiental significativamente melhor para a estrutura de aço. Desempenho económico semelhante, com ligeira vantagem para a estrutura em aço.	AÇO
ESTUDO VI (Junho 2006)	Sistema estrutural de edifício	Comparação entre duas soluções estruturais. Desempenho ambiental.	Sem informação	Consumo de energia, emissões atmosféricas e esgotamento de recursos	Cradle-to-gate	A estrutura de aço tem melhor desempenho nas três categorias, sendo que no consumo de energia a diferença não é muito significativa	AÇO
ESTUDO VII (2007)	Sistema estrutural – m ² de área útil	Comparação entre três soluções estruturais. Desempenho ambiental.	EcolInvent v1.3	Sem informação	Cradle-to-gate	Nenhuma das soluções se destaca com melhor desempenho	EMPATE
ESTUDO VIII (2007)	Sistema estrutural de edifício de escritórios	Comparação entre duas soluções estruturais. Desempenho ambiental.	Sem informação	Consumo de energia e emissões atmosféricas	Cradle-to-grave	O aço tem melhor desempenho nos dois indicadores numa avaliação cradle-to-gate, mas se for uma avaliação cradle-to-grave o betão tem melhor desempenho	BETÃO
ESTUDO IX (Agosto 2010)	Dois edifícios diferentes, com funções iguais. Unidade funcional m ² de área útil	Comparação entre as duas soluções estruturais. Desempenho ambiental.	GaBi 4 LCI	Aquecimento global, potencial de acidificação, eutrofização, smog e energia incorporada não renovável	Cradle-to-gate	Estrutura de aço com melhor desempenho em todas as categorias, com excepção da energia incorporada não renovável.	AÇO
ESTUDO X (2012)	Sistema estrutural de edifício de escritórios, com 3 pisos e 431,50 m ² .	Comparação entre as duas soluções estruturais. Desempenho ambiental.	Sem informação	Energia primária não renovável, potencial de aquecimento global e quantidade de material	Cradle-to-gate + fim de vida	o aço apresenta melhores resultados em todos os indicadores apresentados. No indicador de energia primária não renovável, o betão tem melhor desempenho quando é apenas considerada a fase de produção, mas é ultrapassado pelo aço quando considerado o fim de vida.	AÇO
PRESENTE ESTUDO (Outubro 2012)	Sistema estrutural de um edifício de 1 piso, com 474m ² de área útil	Comparação entre as duas soluções estruturais. Desempenho ambiental e económico quantitativo. Desempenho social qualitativo.	EcolInvent	Desempenho ambiental: Energia renovável incorporada, energia não renovável incorporada, aquecimento global, destruição de ozono, acidificação, eutrofização, formação de ozono troposférico e esgotamento de recursos abióticos; Desempenho económico: Custos de construção: custos de material, equipamento e mão-de-obra; desempenho social: segurança da estrutura, conforto e saúde, planeamento de construção e qualidade arquitectónica.	Desempenho ambiental: Cradle-to-gate. Desempenho económico: cradle-to-gate + construção.	A estrutura de aço apresenta o melhor desempenho ambiental global, mas apresenta pior desempenho na energia não renovável incorporada, destruição de ozono e acidificação. A estrutura de betão apresenta melhor desempenho económico em todos os indicadores. No desempenho social, as duas estruturas apresentam resultados equivalentes. No balanço final, a estrutura de betão apresenta um desempenho mais sustentável.	Desempenho sustentável: BETÃO; Desempenho ambiental: AÇO; Desempenho económico: BETÃO; Desempenho social: EMPATE

Quadro XXII - Síntese das principais informações dos estudos analisados.

Numa primeira análise dos resultados, podemos assumir que, dos doze estudos apresentados, cinco apontam o betão como material mais sustentável, outros cinco indicam o aço com melhor desempenho e dois atribuem um empate entre os materiais. Ainda que a

conclusão desta análise não deva ser encarada desta forma, assumindo um ou outro material mais sustentável através da contagem de votos, até porque se mostram empatados, os resultados permitem acima de tudo perceber que a eleição do material mais sustentável, entre o betão e o aço, não é consensual.

A maioria dos estudos, com exceção do estudo III e IV, que utilizam elementos isolados, assume a unidade funcional como um sistema estrutural completo, com funções semelhantes e constituídos por diferentes materiais. No âmbito da análise, o desempenho ambiental é transversal a todos os estudos, ainda que os indicadores, bem como os métodos utilizados, sejam diferentes. De qualquer forma, as questões relacionadas com o consumo de energia, as emissões atmosféricas e a utilização de recursos são comuns a quase todas as análises, podendo assumir diferentes indicadores ambientais e diferentes importâncias relativas. No que diz respeito ao limite do estudo, na análise do desempenho ambiental, a fase cradle-to-gate é considerada, sendo que alguns abrangem mais fases, como a utilização (estudos I, VIII e IX), a construção (estudo II) ou o fim de vida (estudo X). Para o desempenho económico, apenas considerado em três estudos, foi também considerada a fase de utilização (estudo V(b)) e a fase de construção (presente estudo).

Apesar do resultado final ser diferente, os estudos que mais se aproximam do presente trabalho são os estudos V, VI, IX e X, pois apresentam o aço com o melhor desempenho ambiental, na fase de cradle-to-gate, ainda que os dois últimos acrescentem a fase de utilização. No entanto, o presente trabalho considera também o comportamento económico, aproximando-se, em termos de resultados gerais, do estudo IV. No que diz respeito ao desempenho social, analisado qualitativamente neste trabalho, não é analisado em mais nenhum dos estudos, confirmando que a subjetividade do tema trava o seu desenvolvimento.

Estabelecer a relação entre cada estudo com a presente investigação permite entender algumas das opções que foram tomadas ao longo do trabalho, bem como definir as questões mais sensíveis das metodologias utilizadas, de maneira a promover investigações futuras. Assim, no estudo I, apenas foi considerado o indicador da energia incorporada, sendo que não são fornecidas informações suficientes para uma análise mais profunda dos resultados. Analisando apenas a diferença apresentada, esta pode ser justificada com o aumento do limite de estudo, que apresenta também o período de utilização da estrutura, incluindo a manutenção. Assim, poderíamos considerar que o equilíbrio dos resultados do estudo I foi conseguido através da necessidade de maior manutenção da estrutura em aço. No entanto, os resultados apresentados na energia incorporada inicial apresentam também um grande equilíbrio, pelo que contradizem os

resultados apresentados no presente trabalho. Como não foram apresentados todos os dados referentes aos métodos utilizados para estabelecer as conclusões apresentadas, podemos especular que os diferentes resultados se devem a opções de desenho dos elementos estruturais e/ou à base de dados utilizada. A distância entre as datas de apresentação dos dois estudos pode também justificar as diferenças, pois esta área de investigação tem avançado consideravelmente nos últimos anos.

Ao analisar o estudo II, é de salientar que os resultados se mostram surpreendentes, tendo em consideração que, numa avaliação de desempenho ambiental de duas estruturas de três pisos, na fase cradle-to-gate, a estrutura de betão apresenta melhor desempenho ambiental, no conjunto de indicadores de potencial de aquecimento, toxicidade do ar e da água, desperdícios sólidos e energia incorporada, sendo apenas ultrapassado pela estrutura metálica na utilização de recursos. De maneira a procurar entender estes resultados, os autores promoveram outra comparação das duas estruturas, com o mesmo método mas utilizando um edifício de um piso. Mais próximo das expectativas iniciais, o resultado desta análise foi o oposto, apresentando a estrutura metálica um melhor desempenho em todos os indicadores. Desta forma, podemos concluir que a análise do comportamento ambiental de estruturas depende significativamente do tipo de estrutura escolhido bem como das opções de desenho, onde detalhes, aparentemente sem significado, podem ter influência no desempenho do conjunto.

Esta pode também ser a justificação para a diferença de resultados entre o estudo III e o presente trabalho. Tal como o anterior, o estudo conclui que a produção de uma viga de betão utiliza menos energia e tem menor impacto ambiental do que a produção de uma viga metálica, na consideração da fase cradle-to-gate. No entanto, nos indicadores avaliados, cada uma das vigas apresenta melhor comportamento em três dos seis indicadores, sendo que a eleição do material com menos impacto ambiental resulta da consideração de importâncias relativas diferentes entre os indicadores, informação que não é disponibilizada no documento consultado. Assim, o aço apresenta um melhor desempenho na utilização de recursos, no potencial de aquecimento global e na produção de desperdícios sólidos, pelo que o betão tem melhor desempenho no potencial de toxicidade do ar, da água e no consumo de energia. A importância relativa atribuída a cada indicador pode estar na base das diferenças dos resultados apresentados, bem como a unidade funcional distinta.

No estudo IV, paralelamente à comparação entre dois sistemas estruturais, um de betão e outro em aço, foram analisadas também as alterações nos impactos ambientais de seis vigas de betão provocadas pela variação da respectiva densidade do aço apresentada. Esta análise permitiu verificar que o aumento a percentagem de aço na viga corresponde à

diminuição de energia consumida, consumo de água, emissões de CO₂, emissões de NO_x e custo da estrutura. Apesar de haver um aumento de custo correspondente ao aumento de aço utilizado, este último parâmetro justifica-se com a redução do custo que acompanha a diminuição da secção da viga, no que diz respeito à quantidade de betão e de cofragem. Assim, para a comparação com a viga metálica, a viga de betão armado escolhida foi a viga com melhor comportamento sustentável entre as várias apresentadas. Esta pode ser uma das justificações para que, em termos ambientais, seja considerada a viga de betão com melhor desempenho. Outra questão considerada neste estudo foi o transporte dos locais de produção para o local da obra, sendo que a empresa encontrada para fornecer os elementos metálicos se localizava em Madrid, factor que contribuiu negativamente para os impactos ambientais considerados para a estrutura em aço. Por fim, este estudo indica que a estrutura em betão tem um comportamento mais sustentável do que a estrutura em aço, no que diz respeito ao desempenho ambiental e económico, o que acaba por se aproximar dos resultados obtidos no presente estudo, no que diz respeito ao factor económico.

O estudo V apresenta-se dividido em duas comparações com unidades funcionais distintas. Na primeira parte, V(a), é feita a comparação de uma estrutura em betão armado para uma ponte, com três variantes de estruturas em aço. Estas variantes representam a utilização de aços diferentes, consoante o seu tipo de produção. A estrutura em betão apresenta melhores resultados quando comparada com a estrutura em aço produzido por alto forno, sendo que, pela discrepância de resultados, podemos especular que o aço utilizado no presente estudo não será produzido desta forma. Em relação à estrutura metálica mista, que utiliza os dois tipos de aço, os resultados muito próximos da estrutura de betão podem sugerir que nos estudos em que o resultado foi um empate entre o comportamento dos dois materiais, talvez tenham sido considerados modelos mistos de aço. A estrutura que utilizou apenas aço produzido em forno de arco eléctrico apresenta-se com o melhor comportamento em relação à estrutura de betão, o que pode ser facilmente justificado com a consideração que este tipo de aço utiliza material reciclado como matéria-prima. Pelo resultado obtido, poderemos especular que no presente estudo foi utilizado aço produzido em forno de arco eléctrico, ainda que os resultados não tenham sido tão discrepantes como os apresentados no estudo V(a), o que poderá indicar que houve também mistura de aço produzido em alto forno. No entanto, estes argumentos são apenas especulativos, pois as diferenças de resultados podem ser fruto de outras questões, tal como já vimos anteriormente. Os resultados deste estudo permitem, acima de tudo, perceber que o tipo de material utilizado, neste caso o aço, tem uma grande influência no comportamento ambiental da estrutura, sendo que essa informação deve fazer parte do

processo de análise do ciclo de vida. O facto de se utilizarem base de dados, que trazem vantagens significativas na simplificação do trabalho, implica também que se utilizem valores médios e de referência, algumas vezes redutores e com influência nos resultados obtidos. Este estudo mostrou esse impacto com a variação do tipo de produção de aço, mas também poderia ter sido feito um estudo semelhante com tipos de betões diferentes, consoante o seu método de fabrico ou tipo de material utilizado.

No que diz respeito à segunda parte deste estudo, o V(b), onde a unidade funcional utilizada foi um sistema estrutural de um edifício habitacional, o desempenho ambiental apresentado aproxima-se do que foi apresentado pelo presente estudo, sendo que é no desempenho económico que residem as principais diferenças, ainda que neste o limite do estudo seja alargado à fase de utilização. No presente estudo, a diferença de desempenho económico entre as duas estruturas é muito significativa, permitindo uma vantagem suficiente ao betão para se apresentar com melhor comportamento sustentável, na avaliação global. Os resultados do estudo V(b) mostram que as estruturas em causa apresentam um comportamento económico muito semelhante, com uma ligeira vantagem para a estrutura em aço. Com as informações disponíveis sobre o estudo V, podemos concluir que é na fase de construção que a estrutura de aço ganha vantagem, pois tal como se previa, a fase de manutenção é mais significativa para este material. Especulando sobre as razões dos diferentes resultados, podemos assumir que as diferenças de projeto das estruturas em estudo serão em parte responsáveis por essas diferenças, bem como a base de dados de onde os valores que suportam os custos foram retirados.

O estudo VI apresenta um resultado próximo do presente estudo, ao considerar que o sistema estrutural em aço tem melhor desempenho ambiental do que a estrutura em betão, sendo que os principais indicadores considerados são também próximos dos que foram considerados no presente estudo.

No estudo VII, além da comparação das estruturas em betão e aço, foi também introduzida a estrutura em madeira, que não foi considerada no presente estudo. No entanto, o desempenho ambiental das três estruturas mostra-se muito semelhante. A diferença entre os resultados deste estudo e do presente trabalho pode ser a consideração de edifícios com mais do que um piso, tal como já foi indicado no estudo II.

O estudo VIII apresenta o betão como material com melhor desempenho ambiental, o que surge como resultado oposto ao do presente estudo. No entanto, este resultado é justificado pela consideração da fase cradle-to-grave, onde a utilização e manutenção da estrutura considerada teve uma grande influência no resultado. Este argumento é identificado no próprio estudo, sendo que apresenta o aço com melhor desempenho

ambiental se a avaliação for feita apenas na fase cradle-to-gate, aproximando-se dos resultados do presente trabalho. Estes resultados mostram que a fase de utilização e manutenção da estrutura em aço tem um maior impacto ambiental do que na estrutura em betão, sendo que é relevante a consideração desta fase do ciclo de vida.

O estudo IX aproxima-se do presente estudo ao considerar que a estrutura de aço apresenta melhor comportamento ambiental do que a estrutura em betão. No entanto, como principal conclusão, este estudo considera que, apesar dos resultados, não faz sentido identificar o aço como uma escolha sustentável, pois os impactos ambientais, ainda que menores do que o betão, são de qualquer forma consideráveis. Assim, mais importante do que a escolha do material, este estudo indica que a otimização dos elementos estruturais e do seu desenho tem melhores resultados do que a escolha de um ou outro material.

Por fim, o estudo X apresenta também a estrutura em aço com melhor desempenho ambiental do que a estrutura em betão, tal como o presente estudo. No entanto, o factor mais relevante deste estudo está relacionado com a inclusão do processo do fim de vida na análise de cada estrutura. Este factor tem uma influência significativa nos resultados dos impactos ambientais de cada estrutura, pois os valores de reciclagem e reutilização do material no fim de vida são creditados nos valores dos impactos de produção, fazendo um balanço dos resultados no final. A estrutura em aço tem um benefício muito superior neste processo, pois a percentagem de reciclagem e reutilização é mais significativa do que na estrutura em betão. No caso do potencial de aquecimento global, este factor tem até um efeito prejudicial no comportamento da estrutura em betão, pois o processo de cenário de fim de vida vem aumentar os impactos ambientais desta estrutura. Este estudo promove, desta forma, a reciclagem como uma mais valia dos materiais e que deve ser considerada na avaliação do seu desempenho ambiental. Neste estudo, a avaliação foi apenas focada na dimensão ambiental, mas podemos especular que o desempenho económico iria também ser influenciado pela consideração dos benefícios da reciclagem e reutilização dos materiais no fim de vida do edifício.

Depois de concluída a análise comparativa de todos os estudos com o presente trabalho, podemos identificar vários factores que têm grande influência nos resultados das comparações entre os materiais estruturais: as opções de desenhos dos elementos estruturais, o tipo de estrutura utilizada, o tipo de material utilizado (incluindo o tipo de produção dos materiais), as metodologias aplicadas (incluindo a escolha de base de dados, indicadores e importâncias relativas) e as fases de ciclo de vida consideradas. Além destes factores, em todo o processo são tomadas opções, muitas vezes aparentemente

insignificantes, mas que podem influenciar toda a análise do desempenho do objeto de estudo.

A interpretação das diferenças entre os estudos sobre o comportamento sustentável (ambiental e económico) das estruturas em betão e em aço permite perceber que este tipo de análise é muito complexa e até subjetiva, o que implica que uniformização e sistematização de um processo de avaliação dos sistemas estruturais, bem como de produtos ou materiais, seja uma tarefa difícil de concretizar.

4.2. Sustentabilidade das estruturas de betão e de aço

A escolha dos materiais utilizados na construção é um dos factores mais relevantes para a sustentabilidade do edifício. A sua análise, principalmente na fase de projeto, pode contribuir para uma melhoria significativa do comportamento do conjunto ao longo da sua vida, pelo que a comparação entre várias hipóteses para o mesmo sistema construtivo promove os melhores resultados. Mas quando se pretende comparar o desempenho sustentável da estrutura em aço e da estrutura em betão, é difícil atingir um resultado objetivo, tal como pudemos concluir pela análise dos estudos feita anteriormente. Além disso, as vantagens inerentes da utilização de um ou de outro material, bem como a importância histórica de cada um, dificilmente permitirão que algum dia um seja substituído pelo outro, definitivamente.

No entanto, a evolução tecnológica tem obrigado a adaptação da indústria do betão e do aço aos novos desafios da sustentabilidade, promovendo a evolução dos materiais e das tecnologias no caminho da construção sustentável. Se por um lado, a indústria do betão tem procurado novas soluções para a diminuição da utilização de recursos bem como a promoção de processos de reciclagem, a indústria do aço tem procurado a diminuição dos custos associados à sua produção e a exploração do potencial de reciclagem associado a este material.

De maneira a encontrar soluções mais sustentáveis, a indústria do betão tem como objetivo a redução dos impactos negativos da produção deste material, tanto no esgotamento de recursos como na emissão de poluentes atmosféricos ou no consumo de energia de alguns dos seus constituintes na respectiva produção. Desta forma, um dos caminhos para a evolução sustentável do betão é a alteração da sua constituição tradicional, de maneira a permitir diminuir os respectivos impactos, principalmente na dimensão ambiental. Com a evolução tecnológica tem sido possível substituir parcialmente o cimento por materiais reutilizados, como cinzas volantes das centrais termoelétricas,

cinzas da queima de valorização energética de pneus, resíduos de produção de papel, resíduos da indústria de cerâmica, escórias de alto forno, cinzas de casca de arroz e metacaulino. Atualmente é também possível a substituição parcial ou total de agregados por cinzas volantes e escórias de centrais termoelétricas, resíduos de indústria cerâmica, resíduos de construção e demolição e resíduos de cortiça (no betão leve). A utilização de cinzas volantes como substituto parcial do cimento é um dos melhores exemplos de reutilização de material, pois dá ao betão maior resistência, durabilidade e trabalhabilidade, reaproveitando material produzido abundantemente na indústria. A diminuição de produção de cimento apresenta não só vantagens ambientais, com a diminuição de consumo de subprodutos, energia e emissões atmosféricas, mas económicas, com a diminuição dos custos diretos e a menor necessidade de manutenção, ao melhorar o desempenho e eficiência do produto final. A este produto chama-se betão eco-eficiente (Prof. Aires Mateus, Materiais Eco-Eficientes, Mestrado Construção e Reabilitação Sustentável 2010/12, UM).

A reciclagem do betão é um processo ainda pouco eficiente, principalmente pela dificuldade em separar os elementos constituintes no conjunto do material da demolição, o que implica que os produtos resultantes não apresentem a mesma qualidade do betão inicial. Por esta razão, os produtos reciclados são normalmente utilizados com outras funções, como enchimentos ou pavimentos. Este processo é também responsável pelo consumo de energia e pela produção massiva de pó. Atualmente, a investigação tem procurado alternativas aos processos de reciclagem existentes, como o recente processo que envolve a utilização de grandes quantidades de eletricidade (relâmpagos) para separar as componentes do betão. A eletricidade introduzida no material viaja pelo caminho com menor resistência, isto é, entre o cascalho e a pedra de cimento, separando-os definitivamente. (fonte: <http://www.cienciahoje.pt/index.php?oid=55869&op=all>, 16/10/12)

O potencial de reciclagem do aço é uma das suas características mais sustentáveis, como já vimos anteriormente. O processo de produção em forno de arco eléctrico permite reciclar o metal utilizado sem perder as suas características físicas e mecânicas, reduzindo significativamente os impactos da produção de aço. Ainda que envolva uma quantidade de energia razoável pela necessidade de derreter o metal usado, este processo apresenta um desempenho ambiental mais positivo do que a produção tradicional de aço.

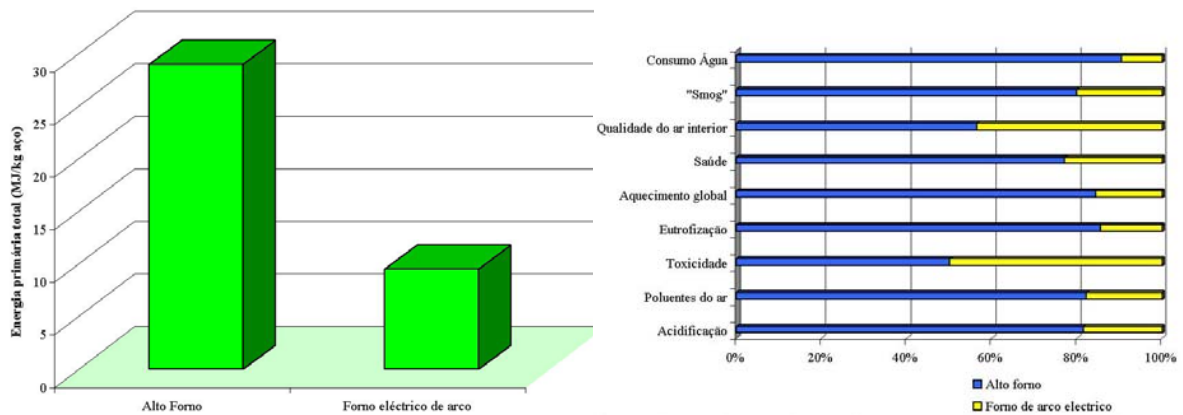


Figure 33 – Comparação entre o consumo de energia e dos impactos da produção de aço em alto forno e a produção em forno de arco eléctrico (Gervásio, 2006).

A evolução do desempenho sustentável do aço passa necessariamente pela maior utilização de aço reciclado, que além de melhorar o desempenho ambiental, tem repercussões económicas, pois reduz os custos iniciais de aquisição de matéria-prima, substituindo-a por material usado. Esta solução pode também evitar a volatilidade do preço dos metais como matéria-prima, que tem grandes variações ao longo do tempo e que são responsáveis pelo aumento do custo das estruturas neste material. Além da reciclagem, novas soluções de proteção contra o fogo e de pintura, bem como processos mais eficientes de montagem são responsáveis pela diminuição do custo deste tipo de construção, permitindo um melhor desempenho sustentável deste material.

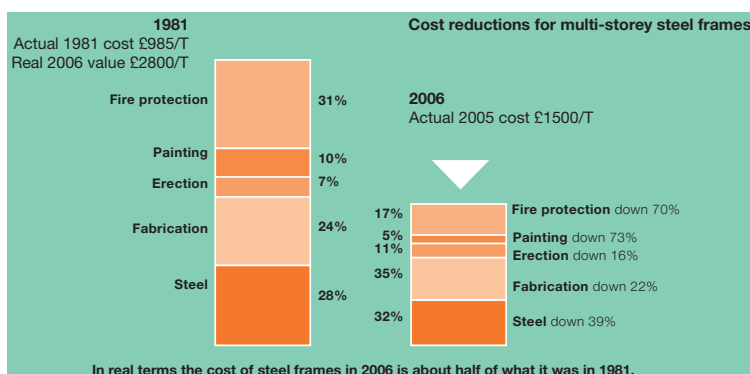


Figure 34 - Alteração do custo de produção do aço ao longo do tempo (fonte: <http://www.corusconstruction.com>).

A escolha entre um ou outro material para o sistema estrutural não é facilmente justificada pelo respectivo comportamento sustentável, como podemos observar dos resultados deste trabalho. Sendo que nenhum dos materiais se destaca como mais sustentável, esta escolha pode estar relacionada com as características inerentes de cada material ou de benefícios pontuais da respectiva opção. No entanto, a possibilidade de

conciliar o melhor de cada material, num sistema estrutural híbrido, mostra o possível caminho da escolha mais sustentável. A proposta de protótipo de sistema estrutural sustentável, apresentado pelos arquitetos Busby, Associates Architects vem contribuir para esta ideia, ao propor um sistema estrutural híbrido, que apresenta elementos em aço, betão e madeira, aproveitando as características de cada material. Assim, para um edifício de três pisos, os autores sugerem pilares e vigas em aço, lajes em betão e estruturas secundárias em madeira. A fácil montagem e desmontagem dos elementos de aço, a resistência ao fogo e as capacidades térmicas e acústicas do betão e a flexibilidade e leveza dos elementos em madeira, são alguns dos critérios sustentáveis que este conjunto apresenta, aliado também à análise LCA dos materiais escolhidos (Busby Architects Associates).



Figure 35 - Protótipo de sistema estrutural sustentável: AÇO + BETÃO + MADEIRA. (Busby Associates Architects).

A ideia de conciliar os materiais estruturais não é inovadora, mas permite, neste contexto, a percepção do equilíbrio entre as várias características sustentáveis de cada material.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusão

A análise da sustentabilidade do tipo de estrutura utilizada na construção é um tema de grande relevância, pois tem implicações no desempenho global do edifício. A escolha entre a estrutura de betão e a estrutura metálica, na perspectiva sustentável, é um processo complicado e pouco consensual. Se por um lado, as duas estruturas tem características muito distintas, facilmente reconhecidas, por outro, o balanço do desempenho sustentável é muito semelhante, ainda que implique um processo complexo de avaliação. Assim, a escolha do material estrutural deve resultar de opções conscientes do comportamento de cada uma das hipóteses, o que implica o conhecimento das respectivas características, que inclui obrigatoriamente a análise LCA dos produtos envolvidos.

Como resultado deste estudo, poderíamos afirmar que a estrutura metálica tem um melhor desempenho ambiental e a estrutura em betão um melhor desempenho económico, sendo que no balanço sustentável a estrutura em betão apresenta o melhor desempenho. No entanto, estas conclusões apenas podem ser assumidas com a consciência das opções que foram tomadas ao longo do processo e de que os resultados se aplicam a estas duas estruturas específicas. A consideração generalizada da estrutura mais sustentável teria que abranger um número maior de exemplos, de maneira a englobar todas as tipologias de estruturas e a permitir que alguma opção tomada num determinado ponto do processo não tivesse um impacto demasiado grande como pode ter acontecido neste trabalho. Em estudos como este, pequenos detalhes podem decidir o resultado final sendo que por essa razão este só pode ser assumido quando para diferentes exemplos o resultado se repete (*Small inputs can lead to disproportionately large consequences – the butterfly effect*. (Gasparatos, El-Haram e Horner, 2009).

Apesar da importância da escolha do material estrutural no desempenho global do edifício, como foi visto neste trabalho, existem também outros factores relevantes a ter em consideração no projeto, onde se incluem preocupações com a forma e o desenho do edifício, a utilização de equipamentos adequados, a implantação correta do edifício, a utilização racional de recursos, água e energia, entre outras. Assim, a consideração de critérios sustentáveis permite que, em conjunto com a correta escolha do material estrutural, o edifício funcione harmoniosamente no meio em que se insere, adoptando uma postura positiva no que diz respeito ao ambiente, à economia e à sociedade.

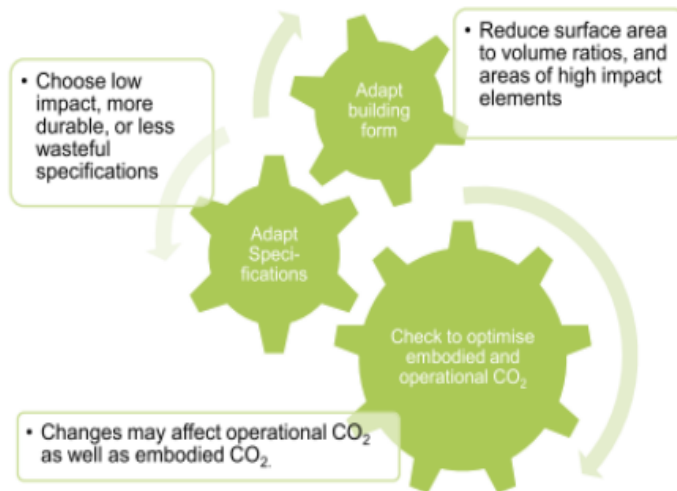


Figure 36 - Formas de minimizar os impactos globais, além da escolha dos materiais (Andersen, 2012).

5.2. Perspectivas de desenvolvimento do trabalho futuro

Os futuros trabalhos de investigação a serem desenvolvidos sobre este tema deverão ter em consideração alguns dos problemas encontrados ao longo deste trabalho. Um deles é o problema da difícil utilização das ferramentas de LCA e avaliação da sustentabilidade pelos projetistas e outros intervenientes na área da construção. Como foi visto neste trabalho, a análise da sustentabilidade das duas estruturas em causa obrigou a um trabalho moroso e complexo. Sendo um tema já por si complicado, mesmo para os profissionais mais envolvidos nesta área, as análises LCA não participam regularmente no processo de construção de um edifício, pois os profissionais envolvidos, arquitetos, engenheiros, etc., não têm capacidade para as utilizar de maneira a melhorar o desempenho do edifício. Ainda que a evolução destes sistemas seja permanente, é necessário integra-los no processo natural de projecto e construção. Assim, a possibilidade de encontrar ferramentas mais acessíveis aos profissionais da construção é um dos caminhos possíveis para a investigação desta área. É importante também acrescentar que a introdução mais significativa do tema da sustentabilidade da estrutura nas ferramentas de avaliação de sustentabilidade e a análise LCA poderá implicar mais progressos nesta área.

Outro tema de desenvolvimento no futuro é a integração de um terceiro material na análise de sustentabilidade das estruturas. O potencial da madeira alia o seu desempenho sustentável com as suas capacidades estruturais, dando-lhe o protagonismo suficiente para integrar a discussão do material estrutural mais sustentável.

Em seguimento deste último aspecto, a comparação dos três materiais estruturais poderá ser desenvolvida no futuro de maneira a encontrar um protótipo de estrutura sustentável, utilizando os três materiais, tal como foi indicado anteriormente. O estudo deste sistema pode promover a criação de modelos estruturais que possam ser desenvolvidos de maneira a serem introduzidos no mercado da construção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, J. (2012). *A Guide to Understanding the Embodied Impacts of Construction Products*. Londres: Construction Products Association.
- Bragança, L., Mateus, R. (2006). *Tecnologias construtivas para a sustentabilidade da construção*. Porto: Edições Ecopy.
- Bragança, L., Pinheiro, M., Jalali, S., Mateus, R., Amoêda, R., Guedes, M. (2007). *Sustainable Construction: Materials and Practices. Challenge of the Industry for the New Millenium*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Bragança, L., Mateus, R. (2009). *Guia de Avaliação SBTool^{PT}-H v2009/2*. Guimarães: Edições iiSBE Portugal.
- Bragança, L. (2010). *Princípios de desempenho e metodologias de avaliação da sustentabilidade das construções*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Bragança, L., Mateus, R. (2011). *Avaliação do Ciclo de Vida dos Edifícios. Impacte Ambiental de Soluções Construtivas*.
- Buckley, M., Halsall, R., Vollering, B., Webber, D. (2002). *Considering sustainability in the selection of structural systems*. Toronto: Halsall Associates Limited.
(ESTUDO II – fonte: <http://livebuilding.queensu.ca/files/Considering%20Sustainability.pdf>)
- Busby Architects Associates. *Structure: Sustainable Building Prototype*. Vancouver: GVRD e Industry Canada.
- Castro, R. Roma. (2008). *O Peso da Estrutura: Influência da Estrutura na Forma Arquitectónica. Muros Portantes versus Estruturas Porticadas*. Porto: Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto.
- Cement Concrete & Aggregates Austrália. (2010). *Sustainable Concrete Buildings*. Concrete, The Responsible Choice (publicação).
- Cement & Concrete Institute. (2011). *Sustainable Concrete*. Mibrand, África do Sul: Cement & Concrete Institute.
- CENT/TC 350. (2011). *Sustainability of Construction Works – Assessment of Environmental Performance of Buildings – Calculation Method*. International Standardisation Organisation.
- Construction Products Association. (2007). *Delivering Sustainability: The Contribution of Construction Products*. Londres: Construction Products Association.

- Costa, A., Appleton, J. (2002). *Estruturas de Betão I; Parte II- Materiais*. Departamento de Engenharia Civil, Grupo de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Davies, P., Osnami, M. (2011). *Low carbon housing refurbishment challenges and incentives: Architects' perspectives*. Reino Unido: Building and Environment (publicação).
- European Concrete Platform. (2009). *Sustainable Benefits of Concrete Structures*. Bruxelas: European Concrete Platform ASBL.
- Fonseca, M. S. (2004). *Curso sobre Regras de Medição na Construção*. Lisboa: LNEC.
- Fonseca, M. S. (2008). *Informação sobre Custos na Construção*. Lisboa: LNEC.
- Gasparatos, A., El-Haram, M., Horner, M. (2009). *The argument against a reductionist approach for measuring sustainable development performance and the need for methodological pluralism*. Building and Environment (publicação).
- Gervásio, H., Silva, L. (2004). *A Sustentabilidade do Aço*. Coimbra: V Congresso de Construção Metálica e Mista.
- Gervásio, H. (2006). *A Sustentabilidade do Aço e das Estruturas Metálicas*. Coimbra.
(ESTUDO V – fonte: http://www.cmm.pt/gcom/publicacoes/conf_nac/cn_172.pdf)
- Gervásio, H., Silva, L. (2008). *Comparative life-cycle analysis of steel-concrete composite bridges*. Coimbra: Structure and Infrastructure Engineering (publicação).
- Godfrey, J., Struble, L. (2004). *How Sustainable is Concrete*. Illinois: University of Illinois at Urbana Champaign.
(ESTUDO III – fonte: <http://www.ctre.iastate.edu/pubs/sustainable/index.htm>)
- Guy, S. (2005). *Forum: Cultures of Architecture and Sustainability*. Building Research & Information (publicação).
- Hindman, D. (2011). *Life Cycle Analysis and Life Cycle Costing Tools applied to Post-Frame Buildings Systems*. Final Report. Virgínia: Virginia Tech.
- Jalali, Said; Torgal, F. Pacheco. (2010). *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Johnson, T. (2006). *Comparison of Environmental Impacts of Steel and Concrete as Building Materials Using the Life Cycle Assessment Method*. Massachusetts: MIT.
(ESTUDO VI – fonte: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/34608>)
- Khasreen, M., Banfill, P., Menzies, G. (2009). *Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review*. Endimburgo: Sustainability (publicação).
- Kendall, A. (2010). *Life-Cycle Assessment: Opportunities for Integration with Building Information Modeling*. University of Califórnia.

- Kerman, P. (2001). *Best Practices Guide: Material Choices for Sustainable Design*. Vancouver: Penner & Associates. (P.1-39).
(ESTUDO I - fonte: <http://www.metrovancouver.org/about/publications/Publications/bestpracticesguidematchoicesforsusdesign081.pdf>)
- Liepina, I. (2011). *Sustainability of Steel and Concrete. Bachelor of Architectural Technology and Construction Management*. Horsens (Dinamarca): Via University College.
- Marosky, N., Dose, J., Fleischer, G., Ackermann, R. (2007). *Challenges of Data Transfer between CAD- and LCA Software Tools*. Berlim: Technical University Berlin, Institute for Environmental Engineering, Department of Systems Environmental Engineering.
- Minson, A. *Concrete Structures*. The Concrete Centre.
- Morbidoni, A., Favi, C., Mandorli, F., Germani, M. (2012). *Environmental Evaluation from Cradle to Grave with CAD-integrated LCA Tools*. Acta Technica Corveniensis - Bulletin of Engineering, Janeiro-Março. Ancona, Itália: Università Politecnica delle Marche.
- NP EN 206-1:2005. (2005). Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade.
- Ochsendorf, J., Norford, L., Brown, D., Durschlag, H., Hsu, S., Love, A., Santero, N., Sweil, O., Webb, A., Wildnauer, M. (2011). *Methods, Impacts and Opportunities in the Concrete Building Life Cycle*. Massachusetts: MIT.
- Passer, A., Cresnik, G., Schuller, D., Maydl, P. (2007). *Life Cycle Assessment of Buildings Comparing Structural Steelwork with other Construction Techniques*. Graz: Institute of Technology and Testing of Building Materials, Graz University of Technology.
(ESTUDO VII – fonte: <http://seeds4green.open-green.net/sites/default/files/Life%20cycle%20assessment%20of%20buildings%20comparing%20structural%20steelwork%20with%20other%20construction%20technique.pdf>)
- Pearce, D. (2006). *Is the construction sector sustainable? Definitions and reflections*. Building Research & Information (publicação).
- Peyroteo, A., Carvalho, C., Jalali, S. (2005). *Avaliação ambiental comparativa de estruturas metálicas e de estruturas de betão armado*. Guimarães: Simpósio Ibero-Americano - O Betão nas Estruturas.
(ESTUDO IV – fonte: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/4731>)
- Ramos, T.. (2009). *Development of regional sustainability indicators and the role of academia in this process: the Portuguese practice*. Lisboa: Journal of Cleaner Production (publicação).
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weifema, B. P., Pennington. (2003). *Life Cycle Assessment. Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis and Applications*. Environmental International 30 (2004) (publicação).

- RICS Construction Faculty. (2003). *Concrete or Steel – The Choice of Frames for Office Buildings*. Technical Report by BCIS.
- Rist, T. (2011). *A path to BIM-based LCA for whole-buildings*. Master Thesis. Noruega: Norwegian University of Science and Technology Department of Civil and Transport Engineering.
- Siebers, R., Hubauer, A., Lange, J., Hauke, B. (2012). *Eco Efficiency of Structural Frames for Low Rise Office Buildings. Concepts and Methods for Steel Intensive Building Projects* (P. 55-70). ECCS – European Convention for Constructional Steelwork.

(ESTUDO X)

- Trusty, W., Horst, S. *Integrating LCA Tools in Green Building Rating Systems*. PA USA: Athena Institute International.
- Wallhagen, M., Glaumann, M., Malmqvist, T. (2011). *Basic Building Life Cycle Calculations to Decrease Contribution to Climate Change – Case Study on an Office Building in Sweden*. Building and Environment (publicação).
- Wang, E., Shen, Z., Barryman, C. (2011). *A Building LCA Case Study Using Autodesk Ecotect and BIM Model*. Construction Systems. Lincoln: University of Nebraska.
- Weisenberger, G. (2010). *A framing system's environmental impact depends on more than just the choice of materials*. Modern Steel Construction (publicação).

(ESTUDO IX-fonte: http://www.modernsteel.com/Uploads/Issues/August_2010/082010_Aug10_Sustainability_web.pdf)

- World Steel Association. (2011). *Life Cycle Assessment Methodology Report*. Bruxelas: World Steel Association.
- Zhang, X., Su, X., Huang, Z. (2007). *Comparison of LCA on Steel- and Concrete-construction Office Buildings: a Case Study*. Xangai: Anhui University of Technology.

(ESTUDO VIII – fonte: http://www.inive.org/lbase_Search/search-detail-airbase-001.asp?ID=101274)

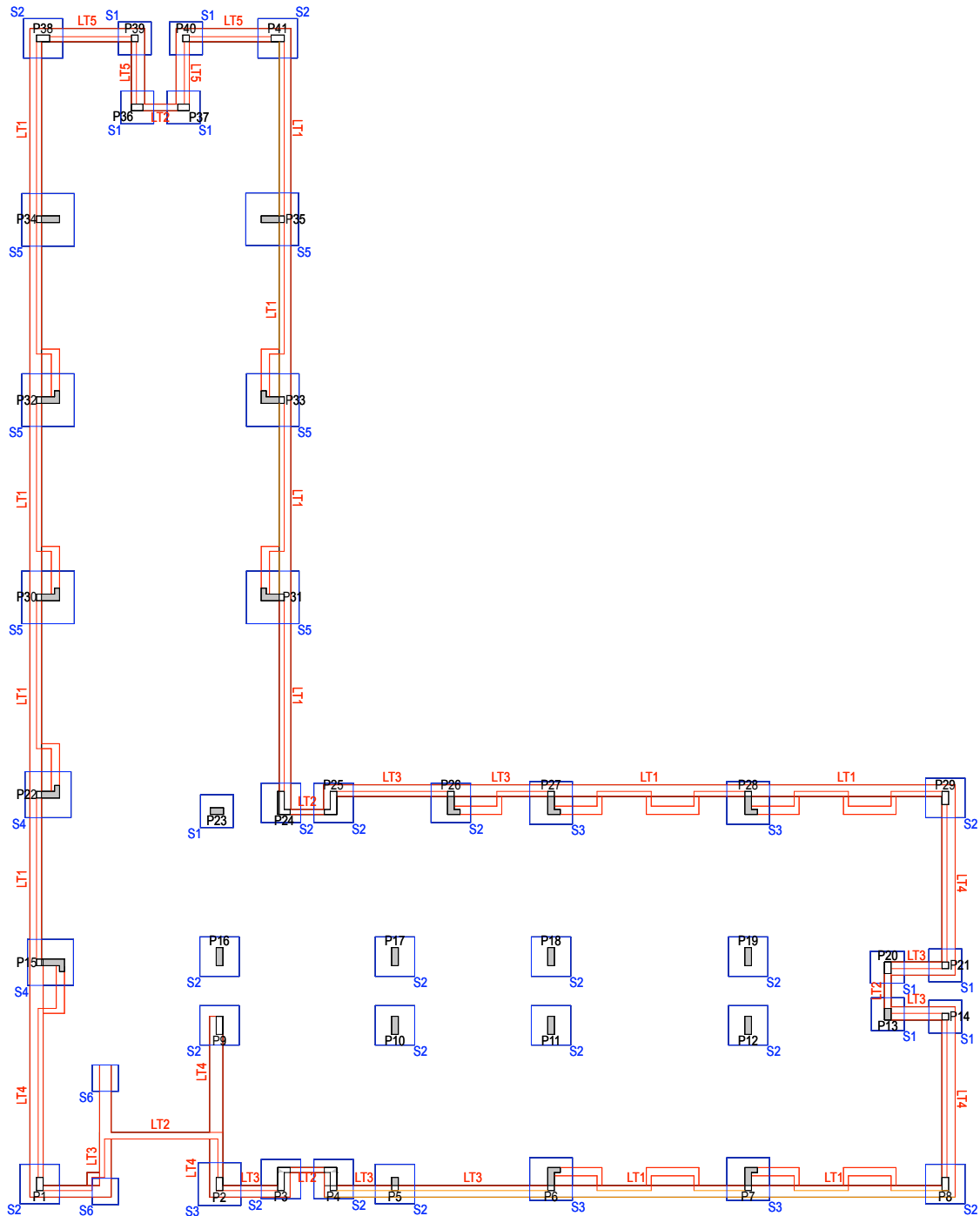
WEBSITE

- ATHENA - <http://www.athenasmi.org/resources/about-lca/>
- BEES - <http://ws680.nist.gov/Bees/>
- BREEAM - <http://www.breeam.org/>
- Canadian Architect - http://www.canadianarchitect.com/asf/perspectives_sustainability/measures_of_sustainability/measures_of_sustainability_embodied.htm
- Carbono Zero - <http://www.carbono-zero.com/artigo.php?mid=23101110&cid=3694>
- Ciência Viva - <http://www.cienciahoje.pt/index.php?oid=55869&op=all>
- Concrete Thinker - <http://www.concretethinker.com/solutions/Life-Cycle-Balance.aspx>
- Construction Products – <http://www.constructionproducts.org.uk>

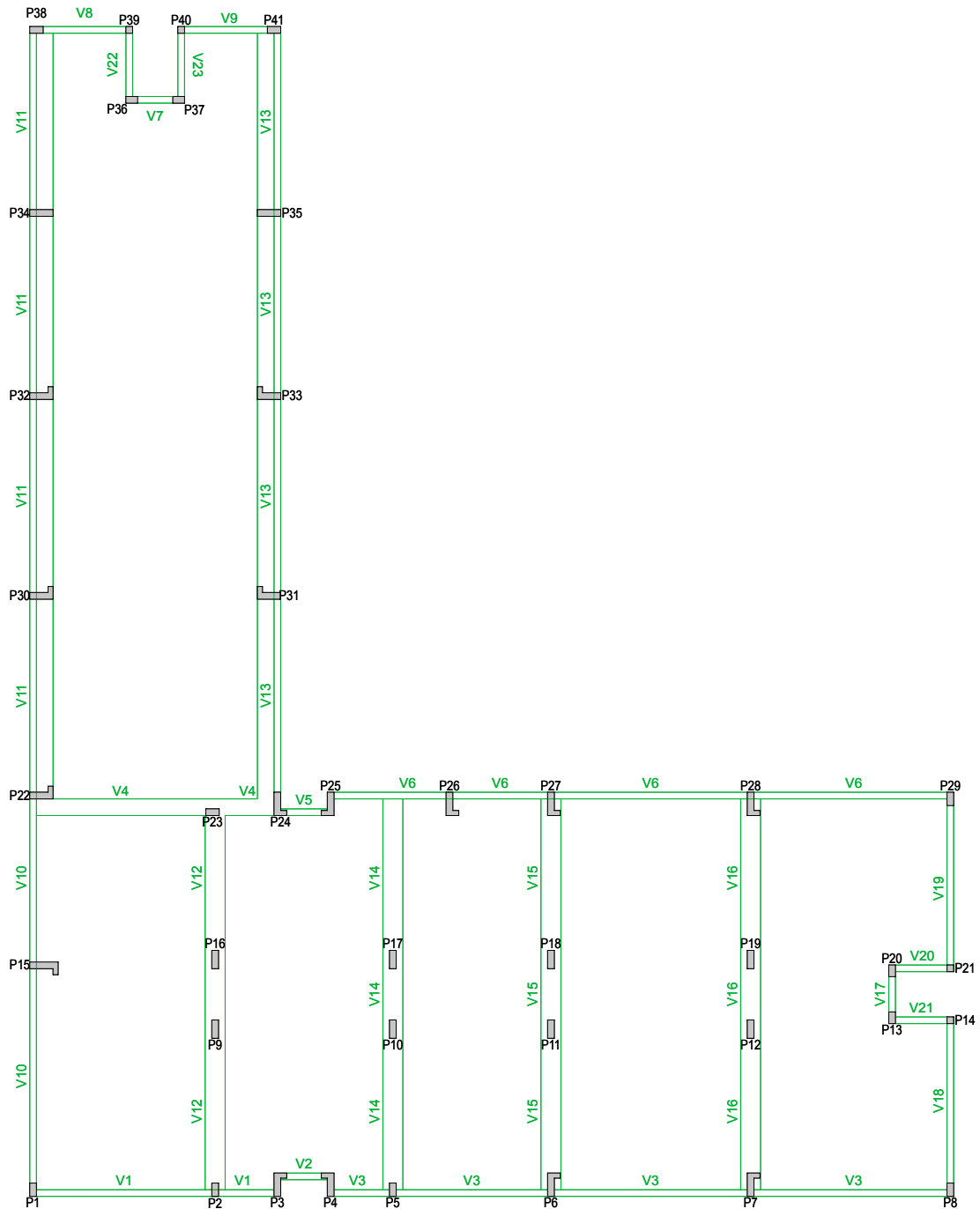
- Corus Construction - <http://www.corusconstruction.com>
- EPA - <http://www.epa.gov/>
- European Platform of LCA - <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/index.vm>
- GaBi - <http://www.gabi-software.com>
- Instituto Nacional de Estatística – <http://www.ine.pt>
- LEED - <http://www.leed.net/>
- LIDERA - <http://www.lidera.info/?p=apresenta&RegionId=3>
- LISA - <http://www.lisa.au.com/index.html>
- Protocolo de Kyoto - <http://www.kyotoprotocol.com/>
- Steel Recycling Institute - <http://www.recycle-steel.org/en/Sustainability> – Steel Recycling Institute
- SIMAPRO - <http://www.simapro.co.uk/aboutsimapro.html>
- World Green Building Council - <http://www.worldgbc.org/>

7. ANEXOS

ANEXO I – PLANTA DA ESTRUTURA A



ANEXO 1 - PLANTA ESQUEMÁTICA DAS FUNDAÇÕES – ESCALA 1/200



ANEXO 2 - PLANTA ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DA COBERTURA – ESCALA 1/200

ANEXO II – DIMENSÕES DOS ELEMENTOS E QUANTIDADE DE MATERIAL DA ESTRUTURA A

PILARES	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.			
P1, P5, P8, P29	4	0,20	0,40	4,96			
P2	1	0,20	0,40	4,96			
P3	1	0,20	0,70	4,96			
	1	0,18	0,15	4,96			
P4	1	0,20	0,70	4,96			
	1	0,18	0,15	4,96			
P6,P7	2	0,20	0,70	4,96			
	2	0,18	0,15	4,96			
P9, P10, P11, P12, P16, P17, P18, P19	8	0,20	0,55	4,96			
P13, P20	2	0,20	0,38	4,96			
P14, P21, P39, P40	4	0,20	0,20	4,96			
P15	1	0,85	0,20	4,96			
	1	0,15	0,18	4,96			
P22	1	0,70	0,20	4,96			
	1	0,15	0,18	4,96			
P23	1	0,40	0,20	4,96			
P24, P26	2	0,20	0,70	4,96			
	2	0,18	0,15	4,96			
P25	1	0,20	0,70	4,96			
	1	0,18	0,15	4,96			
P27, P28	2	0,20	0,70	4,96			
	2	0,18	0,15	4,96			
P30, P32	2	0,20	0,70	4,96			
	2	0,18	0,15	4,96			
P31, P33	2	0,70	0,20	4,96			
	2	0,15	0,18	4,96			
P34, P35	2	0,70	0,20	4,96			
P36, P37	2	0,36	0,20	4,96			
P38, P41	2	0,40	0,20	4,96			
VIGAS	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.			
V1	1	1,87	0,20	0,92			
	1	5,47	0,20	1,51			
LAJETA LB1	1	3,30	1,60	0,08			
V2, V5	2	1,60	0,20	0,92			
V3, V6	2	18,82	0,20	0,92			
V4	1	7,34	0,50	0,28			
V7, V17	2	1,56	0,20	1,52			
V8, V9	2	2,89	0,20	0,92			
V10	1	13,00	0,20	0,92			
V11	1	23,10	0,20	0,92			
	1	23,10	0,50	0,28			
V12	1	11,85	0,60	0,28			
V13	1	23,70	0,20	0,92			
	1	23,70	0,50	0,28			
V14, V15, V16	3	11,94	0,60	0,28			
V18, V19	2	5,02	0,20	0,92			
V20, V21	2	1,85	0,20	0,92			
V22, V23	2	2,10	0,20	0,92			
V24	4	0,85	0,15	0,74			
SAPATAS	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.	COMP.	LARG.	ALT.
S1	9	1,00	1,00	0,40	1,10	1,10	0,05
S2	19	1,20	1,20	0,40	1,30	1,30	0,05
S3	5	1,30	1,30	0,40	1,40	1,40	0,05
S4	2	1,40	1,40	0,50	1,50	1,50	0,05
S5	6	1,60	1,60	0,50	1,70	1,70	0,05
S6	2	0,80	0,80	0,40	0,90	0,90	0,05
LINTÉIS	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.	COMP.	LARG.	ALT.
LT1	1	28,50	0,35	0,52	28,60	0,45	0,05
	1	23,50	0,35	0,52	23,60	0,45	0,05
	2	12,50	0,35	0,52	12,60	0,45	0,05
LT1 ZONA DAS SAPATAS - S2	3	1,20	0,35	1,00	1,30	0,45	0,05
S3	3	1,30	0,35	1,00	1,40	0,45	0,05
S4	1	1,40	0,35	1,00	1,50	0,45	0,05
S5	6	1,60	0,35	1,00	1,70	0,45	0,05
LT2	1	3,00	0,20	0,50	3,10	0,30	0,05
	2	1,00	0,20	0,50	1,10	0,30	0,05
	2	1,10	0,20	0,50	1,20	0,30	0,05
LT2 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	1,20	0,20	1,00	1,30	0,30	0,05
S2	2	1,20	0,20	1,00	1,30	0,30	0,05
LT3	1	7,00	0,35	0,52	7,10	0,45	0,05
	1	10,00	0,35	0,52	10,10	0,45	0,05
	1	4,00	0,35	0,52	4,10	0,45	0,05
	1	2,00	0,35	0,52	2,10	0,45	0,05

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

	2	1,50	0,35	0,52	1,60	0,45	0,05
LT3 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	1,00	0,35	1,00	1,10	0,45	0,05
S2	7	1,20	0,35	1,00	1,30	0,45	0,05
S3	1	1,30	0,35	1,00	1,40	0,45	0,05
S6	2	0,80	0,35	1,00	0,90	0,45	0,05
LT4	2	5,80	0,40	0,52	5,90	0,50	0,05
	1	5,50	0,40	0,52	5,60	0,50	0,05
	1	7,00	0,40	0,52	7,10	0,50	0,05
LT4 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	1,00	0,40	1,00	1,10	0,50	0,05
S2	4	1,20	0,40	1,00	1,30	0,50	0,05
S3	1	1,30	0,40	1,00	1,40	0,50	0,05
LT5	2	3,50	0,40	0,52	3,60	0,50	0,05
	2	2,00	0,40	0,52	2,10	0,50	0,05
LT5 ZONA DAS SAPATAS - S1	4	1,00	0,40	1,00	1,10	0,50	0,05
S2	2	1,20	0,40	1,00	1,30	0,50	0,05
CORTES ZONA DAS JANELAS	15	1,63	0,55	0,21	1,73	0,65	0,05
LAJES PISO TÉRREO	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.	COMP.	LARG.	ALT.
	1	23,00	7,54	0,10	23,00	7,54	0,02
	1	27,76	12,14	0,10	27,76	12,14	0,02

BETÃO

ESTRUTURA A		BETÃO C20/25 (B25)			BETÃO C12/15 (B15)		
PILARES	QTD.	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)
P1, P5, P8, P29	4	1,59	59408,40	23,76	0,00	0,00	0,00
P2	1	0,40					
P3	1	0,69					
	1	0,13					
P4	1	0,69					
	1	0,13					
P6, P7	2	1,39					
	2	0,27					
P9, P10, P11, P12, P16, P17, P18, P19	8	4,36					
P13, P20	2	0,75					
P14, P21, P39, P40	4	0,79					
P15	1	0,84					
	1	0,13					
P22	1	0,69					
	1	0,13					
P23	1	0,40					
P24, P26	2	1,39					
	2	0,27					
P25	1	0,69					
	1	0,13					
P27, P28	2	1,39					
	2	0,27					
P30, P32	2	1,39					
	2	0,27					
P31, P33	2	1,39					
	2	0,27					
P34, P35	2	1,39					
P36, P37	2	0,71					
P38, P41	2	0,79					
VIGAS	QTD.	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)
V1	1	0,34	13,99	5,99	0,00	0,00	0,00
	1	1,65					
LAJETA LB1	1	0,42					
V2, V5	2	0,59					
V3, V6	2	6,93					
V4	1	1,03					
V7, V17	2	0,95					
V8, V9	2	1,06					
V10	1	2,39					
V11	1	4,25					
	1	3,23					
V12	1	1,99					

peso do betão

2500,00

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

V13	1	4,36						
	1	3,32						
V14, V15, V16	3	6,02						
V18, V19	2	1,85						
V20, V21	2	0,68						
V22, V23	2	0,77						
V24	4	0,38	105536,75	42,21		0,00	0,00	
SAPATAS	QTD.	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	
S1	9	3,60			0,54			
S2	19	10,94			1,61			
S3	5	3,38			0,49			
S4	2	1,96			0,23			
S5	6	7,68			0,87			
S6	2	0,51	70175,00	28,07	0,08	9532,50	3,81	
LINTÉIS	QTD.	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	
LT1	1	5,14			0,64			
	1	4,24			0,53			
	2	4,51			0,57			
LT1 ZONA DAS SAPATAS - S2	3	1,26			0,09			
S3	3	1,37			0,09			
S4	1	0,49			0,03			
S5	6	3,36			0,23			
LT2	1	0,30			0,05			
	2	0,20			0,03			
	2	0,22			0,04			
LT2 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	0,48			0,04			
S2	2	0,48			0,04			
LT3	1	1,26			0,16			
	1	1,80			0,23			
	1	0,72			0,09			
	1	0,36			0,05			
	2	0,54			0,07			
LT3 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	0,70			0,05			
S2	7	2,94			0,20			
S3	1	0,46			0,03			
S6	2	0,56			0,04			
LT4	2	2,39			0,30			
	1	1,13			0,14			
	1	1,44			0,18			
LT4 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	0,80			0,06			
S2	4	1,92			0,13			
S3	1	0,52			0,04			
LT5	2	1,44			0,18			
	2	0,82			0,11			
LT5 ZONA DAS SAPATAS - S1	4	1,60			0,11			
S2	2	0,96			0,07			
CORTES ZONA DAS JANELAS	15	2,82	118054,16	47,22	0,84	13602,81	5,44	
LAJES PISO TÉRREO	QTD.	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	TOTAL (m²)
	1	17,34			3,47			
	1	33,70	127606,60	51,04	6,74	25521,32	10,21	488,92
			480780,91	192,31		48656,63	19,46	

AÇO

PILARES	QTD.	Diâmetro do Varão			PESO POR UNIDADE	PESO TOTAL
		6	10	12		
P1, P5, P8, P29	4	48,00	0,0	55,84	60,24	240,97
P2	1	48,00	0,0	55,84	60,24	60,24
P3	1	114,40	37,26	41,88	85,58	85,58
P4	1	114,40	37,26	41,88	85,58	85,58

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

P6, P7	2	114,40	37,26	41,88	85,58	171,15		
P9, P10, P11, P12, P16, P17, P18, P19	8	60,00	0,0	55,84	62,91	503,25		
P13, P20	2	46,40	0,0	41,88	47,49	94,98		
P14, P21, P39, P40	4	32,00	0,0	27,92	31,90	127,59		
P15	1	142,40	62,10	27,92	94,72	94,72		
P22	1	114,40	49,68	27,92	80,84	80,84		
P23	1	48,00	0,0	55,84	60,24	60,24		
P24, P26	2	114,40	37,26	41,88	85,58	171,15		
P25	1	114,40	37,26	41,88	85,58	85,58		
P27, P28	2	114,40	37,26	41,88	85,58	171,15		
P30, P32	2	114,40	37,26	41,88	85,58	171,15		
P31, P33	2	114,40	37,26	41,88	85,58	171,15		
P34, P35	2	72,00	0,0	69,80	77,97	155,93		
P36, P37	2	44,80	0,0	41,88	47,14	94,27		
P38, P41	2	48,00	0,0	55,84	60,24	120,48		
							2746,00	TOTAL PILARES (Kg)
VIGAS	QTD.	Diâmetro do Varão					PESO POR UNIDADE	PESO TOTAL
		6	8	10	12	16		
V1	1	120,14	52,84	0	36,87	13,02	100,86	100,86
LAJETA LB1	1	80,37	62,62	0	0	0	42,58	42,58
V2, V5	2	20,16	9,00	0	13,20	0	19,75	39,50
V3	1	213,02	95,10	0	103,90	0	177,12	177,12
V4	1	0	58,81	0	65,70	0	81,57	81,57
V6	1	213,02	95,10	0	111,28	4,39	190,61	190,61
V7, V17	2	30,27	8,80	0	13,00	0	21,74	43,48
V8, V9	2	34,61	15,45	0	19,65	0	31,23	62,47
V10	1	147,84	66,00	0	43,06	34,02	150,88	150,88
V11	1	260,96	228,34	0	157,14	153,22	529,76	529,76
V12	1	57,84	106,04	0	53,36	111,70	278,60	278,60
V13	1	267,68	234,22	0	163,94	141,28	520,74	520,74
V14	1	58,27	106,83	0	64,48	104,00	276,71	276,71
V15, V16	2	58,27	106,83	0	56,56	133,30	315,97	631,95
V18, V19	2	62,61	26,95	0	21,69	18,69	73,34	146,67
V20, V21	2	24,08	9,75	0	15,95	0	23,36	46,72
V22, V23	2	28,00	11,50	0	17,70	0	26,48	52,95
V24	4	9,35	7,12	3,56	0	0	7,08	28,33
							3401,50	TOTAL VIGAS (Kg)
SAPATAS	QTD.	Diâmetro do Varão		PESO POR UNIDADE	PESO TOTAL			
		10	12					
S1	9	0	21,60	19,18	172,63			
S2	19	0	14,00	12,43	236,21			
S3	5	0	15,75	13,99	69,93			
S4	2	0	24,80	22,02	44,04			
S5	6	0	30,33	26,94	161,62			
S6	2	8,00	0	4,94	9,87			
						694,30		TOTAL SAPATAS (Kg)
LINTÉIS	QTD.	Diâmetro do Varão			PESO POR UNIDADE	PESO TOTAL		
		8	12	16				
LT1	1	357,32	0	298,12	612,17	612,17		
	1	295,07	0	248,12	508,58	508,58		

	2	158,12	0	138,12	280,69	561,37
LT1 S2	3	0	18,90	0	16,78	50,35
LT1 S3	3	0	18,90	0	16,78	50,35
LT1 S4	1	0	20,10	0	17,85	17,85
LT1 S5	6	0	20,10	0	17,85	107,09
LT2	1	33,60	0	17,44	40,83	40,83
	2	12,60	0	9,44	19,89	39,78
	1	13,65	0	9,84	20,94	20,94
LT2 S1	2	0	18,00	0	15,98	31,97
LT2 S2	2	0	18,00	0	15,98	31,97
LT3	1	219,24	32,80	32,48	167,04	167,04
	1	310,59	44,80	44,48	232,74	232,74
	1	127,89	20,80	20,48	101,35	101,35
	1	66,99	12,80	12,48	57,55	57,55
	2	51,77	10,80	10,48	46,60	93,19
LT3 S1	2	0	18,90	0	16,78	33,57
LT3 S2	7	0	18,90	0	16,78	117,48
LT3 S3	1	0	18,90	0	16,78	16,78
LT3 S6	2	0	18,90	0	16,78	33,57
LT4	2	75,60	0	71,12	142,23	284,46
	1	71,82	0	68,12	136,00	136,00
	1	90,72	0	83,12	167,16	167,16
LT4 S1	2	0	19,20	0	17,05	34,10
LT4 S2	4	0	19,20	0	17,05	68,20
LT4 S3	1	0	19,20	0	17,05	17,05
LT5	2	46,62	18,80	27,72	78,91	157,81
	2	27,72	12,80	18,72	51,89	103,79
LT5 S1	4	0	19,20	0	17,05	68,20
LT5 S2	2	0	19,20	0	17,05	34,10
ZONA DAS JANELAS	15	20,95	0	0	8,28	124,15
LAJE PAV. TÉRREO	QTD.	ÁREA	MALHASOL AQ38	PESO TOTAL	TOTAL ÁREA (m ²)	
L1	1	173,42	1,77	306,95		
L2	1	337,01	1,77	596,50	488,92	

4121,54	TOTAL LINTÉIS (Kg)	
	10963,34	TOTAL A400NR (Kg)
903,45	TOTAL PAV. (Kg)	
	903,45	TOTAL A500EL (Kg)
	11866,79	TOTAL AÇO (Kg)

COFRAGEM

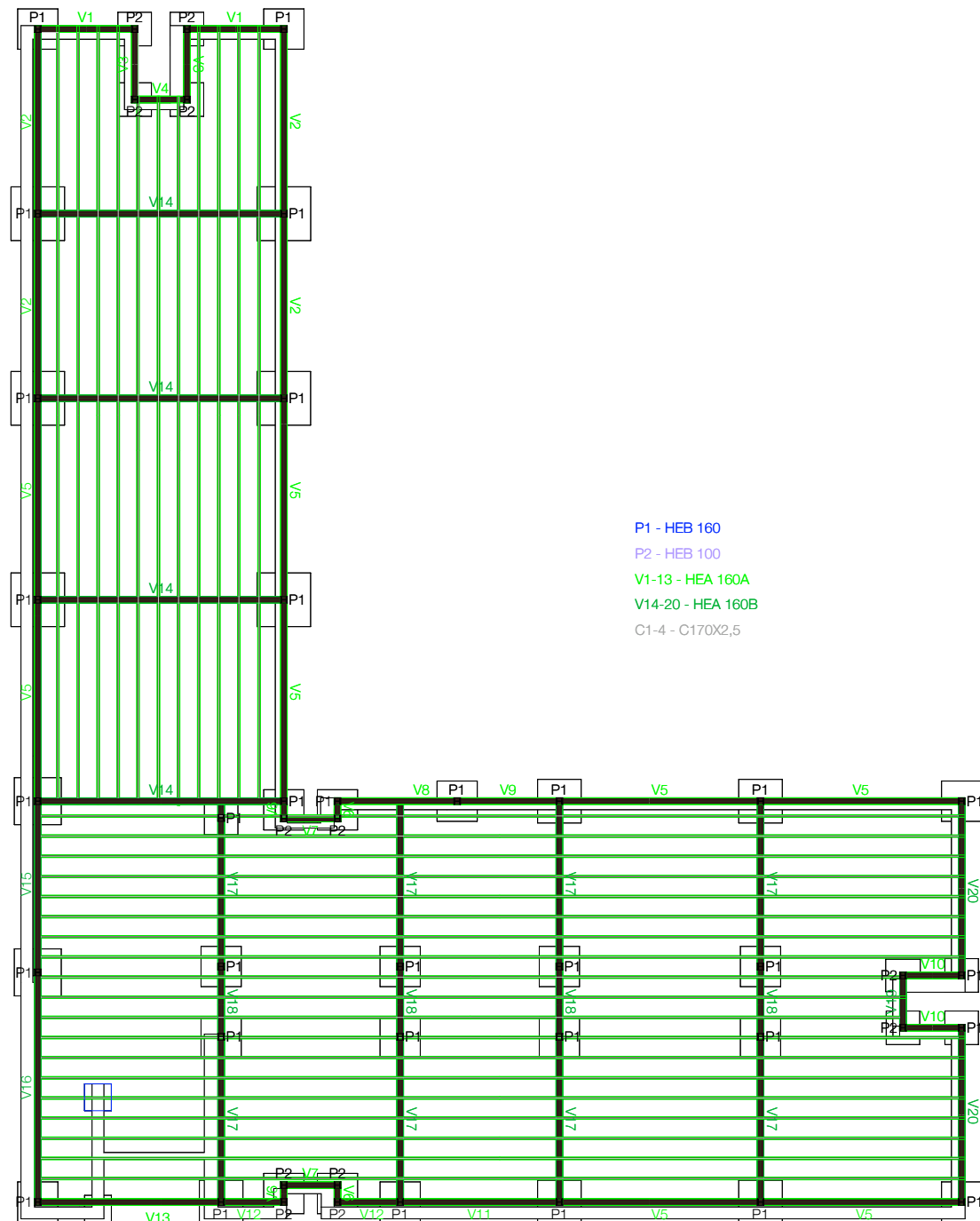
PILARES	QTD.	PARCIAL	TOTAL (m ²)
P1,P5,P8,P29	4	21,41	
P2	1	5,35	
P3	1	8,03	
	1	2,95	
P4	1	8,03	
	1	2,95	
P6,P7	2	16,06	
	2	5,89	
P9,P10,P11,P12,P16,P17,P18,P19	8	53,52	
P13,P20	2	10,35	
P14,P21,P39,P40	4	14,27	
P15	1	9,37	

	1	2,95	312,99
P22	1	8,03	
	1	2,95	
P23	1	5,35	
P24,P26	2	16,06	
	2	5,89	
P25	1	8,03	
	1	2,95	
P27,P28	2	16,06	
	2	5,89	
P30,P32	2	16,06	
	2	5,89	
P31,P33	2	16,06	
	2	5,89	
P34,P35	2	16,06	
P36,P37	2	9,99	
P38,P41	2	10,70	312,99
VIGAS	QTD.	PARCIAL	TOTAL (m²)
V1	1	3,35	348,41
	1	16,25	
LAJETA LB1	1	4,98	
V2, V5	2	5,72	
V3, V6	2	67,38	
V4	1	5,95	
V7, V17	2	9,32	
V8,V9	2	10,34	
V10	1	23,27	
V11	1	41,35	
	1	18,71	
V12	1	10,78	
V13	1	42,42	
	1	19,20	
V14,V15,V16	3	32,58	
V18,V19	2	17,98	
V20,V21	2	6,62	
V22,V23	2	7,52	
V24	4	4,69	348,41
SAPATAS	QTD.	PARCIAL	TOTAL (m²)
S1	9	14,40	88,64
S2	19	36,48	
S3	5	10,40	
S4	2	5,60	
S5	6	19,20	
S6	2	2,56	88,64
LINTÉIS	QTD.	PARCIAL	TOTAL (m²)
LT1	1	29,36	312,99
	1	24,21	
	2	25,75	
LT1 ZONA DAS SAPATAS -S2	3	7,20	
S3	3	7,80	
S4	1	2,80	
S5	6	19,20	
LT2	1	3,00	
	2	2,00	
	2	2,20	
LT2 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	4,80	
S2	2	4,80	
LT3	1	7,21	
	1	10,30	
	1	4,12	
	1	2,06	
	2	3,09	
LT3 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	4,00	
S2	7	16,80	
S3	1	2,60	
S6	2	3,20	
LT4	2	11,95	

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

	1	5,67	
	1	7,21	
LT4 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	4,00	
S2	4	9,60	
S3	1	2,60	
LT5	2	7,21	
	2	4,12	
LT5 ZONA DAS SAPATAS - S1	4	8,00	
S2	2	4,80	
CORTES ZONA DAS JANELAS	15	10,24	261,88
LAJES PISO TÉRREO	QTD.	PARCIAL	TOTAL (m ²)
	1	0,00	
	1	0,00	0,00
			1011,92
			TOTAL COFRAGEM (m ²)

ANEXO III – PLANTA DA ESTRUTURA B



ANEXO 3 - PLANTA ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DA COBERTURA - ESCALA 1/200 (A PLANTA ESQUEMÁTICA DAS FUNDAÇÕES É SEMELHANTE À DA ESTRUTURA A)

ANEXO IV - DIMENSÕES DOS ELEMENTOS E QUANTIDADE DE MATERIAL DA ESTRUTURA B

PILARES	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.			
P1 - HEB160	32	0,16	0,16	4,96			
P2 - HEB100	13	0,10	0,10	4,96			
VIGAS	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.			
HEA160A							
V1	2	2,89	0,160	0,152			
V2	4	5,50	0,160	0,152			
V3	2	2,10	0,160	0,152			
V4	1	1,56	0,160	0,152			
V5	8	6,00	0,160	0,152			
V6	4	0,52	0,160	0,152			
V7	2	1,60	0,160	0,152			
V8	1	3,57	0,160	0,152			
V9	1	3,05	0,160	0,152			
V10	2	1,75	0,160	0,152			
V11	1	4,75	0,160	0,152			
V12	2	1,87	0,160	0,152			
V13	1	5,47	0,160	0,152			
HEA160B							
V14	4	7,34	0,160	0,152			
V15	1	5,10	0,160	0,152			
V16	1	6,84	0,160	0,152			
V17	8	4,92	0,160	0,152			
V18	4	2,09	0,160	0,152			
V19	1	1,56	0,160	0,152			
V20	2	5,19	0,160	0,152			
C170X2,5 - perfil de fixação da cobertura							
C1	8	22,80					
C2	3	20,70					
C3	16	27,36					
C4	3	25,61					
SAPATAS	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.	COMP.	LARG.	ALT.
S1	9	1,00	1,00	0,40	1,10	1,10	0,05
S2	19	1,20	1,20	0,40	1,30	1,30	0,05
S3	5	1,30	1,30	0,40	1,40	1,40	0,05
S4	2	1,40	1,40	0,50	1,50	1,50	0,05
S5	6	1,60	1,60	0,50	1,70	1,70	0,05
S6	2	0,80	0,80	0,40	0,90	0,90	0,05
LINTÉIS	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.	COMP.	LARG.	ALT.
LT1	1	28,50	0,35	0,52	28,60	0,45	0,05
	1	23,50	0,35	0,52	23,60	0,45	0,05
	2	12,50	0,35	0,52	12,60	0,45	0,05
LT1 ZONA DAS SAPATAS -S2	3	1,20	0,35	1,00	1,30	0,45	0,05
S3	3	1,30	0,35	1,00	1,40	0,45	0,05
S4	1	1,40	0,35	1,00	1,50	0,45	0,05
S5	6	1,60	0,35	1,00	1,70	0,45	0,05

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

LT2	1	3,00	0,20	0,50	3,10	0,30	0,05
	2	1,00	0,20	0,50	1,10	0,30	0,05
	2	1,10	0,20	0,50	1,20	0,30	0,05
LT2 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	1,20	0,20	1,00	1,30	0,30	0,05
S2	2	1,20	0,20	1,00	1,30	0,30	0,05
LT3	1	7,00	0,35	0,52	7,10	0,45	0,05
	1	10,00	0,35	0,52	10,10	0,45	0,05
	1	4,00	0,35	0,52	4,10	0,45	0,05
	1	2,00	0,35	0,52	2,10	0,45	0,05
	2	1,50	0,35	0,52	1,60	0,45	0,05
LT3 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	1,00	0,35	1,00	1,10	0,45	0,05
S2	7	1,20	0,35	1,00	1,30	0,45	0,05
S3	1	1,30	0,35	1,00	1,40	0,45	0,05
S6	2	0,80	0,35	1,00	0,90	0,45	0,05
LT4	2	5,80	0,40	0,52	5,90	0,50	0,05
	1	5,50	0,40	0,52	5,60	0,50	0,05
	1	7,00	0,40	0,52	7,10	0,50	0,05
LT4 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	1,00	0,40	1,00	1,10	0,50	0,05
S2	4	1,20	0,40	1,00	1,30	0,50	0,05
S3	1	1,30	0,40	1,00	1,40	0,50	0,05
LT5	2	3,50	0,40	0,52	3,60	0,50	0,05
	2	2,00	0,40	0,52	2,10	0,50	0,05
LT5 ZONA DAS SAPATAS - S1	4	1,00	0,40	1,00	1,10	0,50	0,05
S2	2	1,20	0,40	1,00	1,30	0,50	0,05
CORTES ZONA DAS JANELAS	15	1,63	0,55	0,21	1,73	0,65	0,05
LAJES PISO TÉRREO	QTD.	COMP.	LARG.	ALT.	COMP.	LARG.	ALT.
	1	23,00	7,54	0,10	23,00	7,54	0,02
	1	27,76	12,14	0,10	27,76	12,14	0,02

BETÃO

		BETÃO C20/25 (B25)			BETÃO C12/15 (B15)			peso do betão
PILARES	QTD.	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	
	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2500,00
VIGAS	QTD.	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL	TOTAL (m³)	
	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SAPATAS	QTD.	PARCIAL	TOTAL (Kg)	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL	TOTAL (m³)	
S1	9	3,60			0,54			
S2	19	10,94			1,61			
S3	5	3,38			0,49			
S4	2	1,96			0,23			
S5	6	7,68			0,87			
S6	2	0,51	70175,00	28,07	0,08	9532,50	3,81	
LINTÉIS	QTD.	PARCIAL	TOTAL	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL	TOTAL (m³)	
LT1	1	5,14			0,64			
	1	4,24			0,53			
	2	4,51			0,57			
LT1 ZONA DAS SAPATAS -S2	3	1,26			0,09			

S3	3	1,37			0,09			
S4	1	0,49			0,03			
S5	6	3,36			0,23			
LT2	1	0,30			0,05			
	2	0,20			0,03			
	2	0,22			0,04			
LT2 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	0,48			0,04			
S2	2	0,48			0,04			
LT3	1	1,26			0,16			
	1	1,80			0,23			
	1	0,72			0,09			
	1	0,36			0,05			
	2	0,54			0,07			
LT3 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	0,70			0,05			
S2	7	2,94			0,20			
S3	1	0,46			0,03			
S6	2	0,56			0,04			
LT4	2	2,39			0,30			
	1	1,13			0,14			
	1	1,44			0,18			
LT4 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	0,80			0,06			
S2	4	1,92			0,13			
S3	1	0,52			0,04			
LT5	2	1,44			0,18			
	2	0,82			0,11			
LT5 ZONA DAS SAPATAS - S1	4	1,60			0,11			
S2	2	0,96			0,07			
CORTES ZONA DAS JANELAS	15	2,82	118054,16	47,22	0,84	13602,81	5,44	
LAJES PISO TERREO	QTD.	PARCIAL	TOTAL	TOTAL (m³)	PARCIAL	TOTAL	TOTAL (m³)	TOTAL (m2)
	1	17,34			3,47			
	1	33,70	127606,60	51,04	6,74	25521,32	10,21	488,92
			315835,76	126,33		48656,63	19,46	

AÇO

PILARES	QTD.	ALTURA	Kg/m	PESO TOTAL
P1 - HEB160	32	4,96	42,60	6761,47
P2 - HEB100	13	4,96	20,40	1315,39
VIGAS	QTD.	COMPRIMENTO	Kg/m	PESO TOTAL
HEA160A				
V1	2	2,89	30,40	175,71
V2	4	5,50	30,40	668,80
V3	2	2,10	30,40	127,68
V4	1	1,56	30,40	47,42
V5	8	6,00	30,40	1459,20
V6	4	0,52	30,40	63,23
V7	2	1,60	30,40	97,28
V8	1	3,57	30,40	108,53
V9	1	3,05	30,40	92,72
V10	2	1,75	30,40	106,40
V11	1	4,75	30,40	144,40
V12	2	1,87	30,40	113,70
V13	1	5,47	30,40	166,29
HEA160B				
V14	4	7,34	42,60	1250,74

8076,86	TOTAL PILARES (Kg)
---------	--------------------

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

V15	1	5,10	42,60	217,26
V16	1	6,84	42,60	291,38
V17	8	4,92	42,60	1676,74
V18	4	2,09	42,60	356,14
V19	1	1,56	42,60	66,46
V20	2	5,19	42,60	442,19

C170x2,5 - perfil de fixação da cobertura

C1	8	22,80	6,545	1193,81
C2	3	20,70	6,545	406,44
C3	16	27,36	6,545	2865,14
C4	3	25,61	6,545	502,85
Ligações		30% do total dos perfis de fixação		
Ligações Pilar+Viga		10% do total de pilares e vigas		

Medição de Armadura (o cálculo foi feito com base nos valores do mapa de quantidades e nos desenhos de estruturas, fornecido pelo projecto de estruturas)

SAPATAS	QTD.	Diâmetro do Varão		PESO POR UNIDADE	PESO TOTAL	
		10,00	12,00			
S1	9	0	21,60	19,18	172,63	
S2	19	0	14,00	12,43	236,21	
S3	5	0	15,75	13,99	69,93	
S4	2	0	24,80	22,02	44,04	
S5	6	0	30,33	26,94	161,62	
S6	2	8,00	0	4,94	9,87	
LINTÉIS	QTD.	Diâmetro do Varão			PESO POR UNIDADE	PESO TOTAL
		8	12	16		
LT1	1	357,32	0	298,12	612,17	612,17
	1	295,07	0	248,12	508,58	508,58
	2	158,12	0	138,12	280,69	561,37
LT1 S2	3	0	18,90	0	16,78	50,35
LT1 S3	3	0	18,90	0	16,78	50,35
LT1 S4	1	0	20,10	0	17,85	17,85
LT1 S5	6	0	20,10	0	17,85	107,09
LT2	1	33,60	0	17,44	40,83	40,83
	2	12,60	0	9,44	19,89	39,78
	1	13,65	0	9,84	20,94	20,94
LT2 S1	2	0	18,00	0	15,98	31,97
LT2 S2	2	0	18,00	0	15,98	31,97
LT3	1	219,24	32,80	32,48	167,04	167,04
	1	310,59	44,80	44,48	232,74	232,74
	1	127,89	20,80	20,48	101,35	101,35
	1	66,99	12,80	12,48	57,55	57,55
	2	51,77	10,80	10,48	46,60	93,19
LT3 S1	2	0	18,90	0	16,78	33,57
LT3 S2	7	0	18,90	0	16,78	117,48
LT3 S3	1	0	18,90	0	16,78	16,78
LT3 S6	2	0	18,90	0	16,78	33,57
LT4	2	75,60	0	71,12	142,23	284,46
	1	71,82	0	68,12	136,00	136,00
	1	90,72	0	83,12	167,16	167,16
LT4 S1	2	0	19,20	0	17,05	34,10
LT4 S2	4	0	19,20	0	17,05	68,20
LT4 S3	1	0	19,20	0	17,05	17,05
LT5	2	46,62	18,80	27,72	78,91	157,81
	2	27,72	12,80	18,72	51,89	103,79
LT5 S1	4	0	19,20	0	17,05	68,20
LT5 S2	2	0	19,20	0	17,05	34,10
ZONA DAS JANELAS	15	20,95	0	0	8,28	124,15
LAJE PAV. TÉRREO	QTD.	ÁREA	MALHASOL AQ38	PESO TOTAL	ÁREA TOTAL	

7672,26	TOTAL VIGAS (Kg)
---------	------------------

4968,24	TOTAL PERFIS COBERTURA (Kg)
1490,47	TOTAL ACESSÓRIOS (Kg)
1574,91	TOTAL LIGAÇÕES (Kg)
23782,75	TOTAL PERFIL (Kg)

694,30	TOTAL SAPATAS (Kg)
--------	--------------------

4121,54	TOTAL LINTÉIS (Kg)
4815,84	TOTAL A400NR (Kg)

					(m ²)
L1	1	173,42	1,77	306,95	
L2	1	337,01	1,77	596,50	488,92

903,45	TOTAL PAVIMENTO (Kg)
903,45	TOTAL A500EL (Kg)

5719,29	TOTAL AÇO EM VARÃO (Kg)
---------	-------------------------

COFRAGEM

PILARES	QTD.	PARCIAL	TOTAL
			0,00
VIGAS	QTD.	PARCIAL	TOTAL
			0,00
SAPATAS	QTD.	PARCIAL	TOTAL
S1	9	14,40	
S2	19	36,48	
S3	5	10,40	
S4	2	5,60	
S5	6	19,20	
S6	2	2,56	88,64
LINTÉIS			
LT1	1	29,36	
	1	24,21	
	2	25,75	
LT1 ZONA DAS SAPATAS - S2	3	7,20	
S3	3	7,80	
S4	1	2,80	
S5	6	19,20	
LT2	1	3,00	
	2	2,00	
	2	2,20	
LT2 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	4,80	
S2	2	4,80	
	1	7,21	
LT3	1	10,30	
	1	4,12	
	1	2,06	
	2	3,09	
LT3 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	4,00	
S2	7	16,80	
S3	1	2,60	
S6	2	3,20	
	2	11,95	
LT4	1	5,67	
	1	7,21	
LT4 ZONA DAS SAPATAS - S1	2	4,00	
S2	4	9,60	
S3	1	2,60	
LT5	2	7,21	
	2	4,12	
LT5 ZONA DAS SAPATAS - S1	4	8,00	
S2	2	4,80	
CORTES ZONA DAS JANELAS	15	10,24	261,88
LAJES PISO TÉRREO			
	1		
	1		0,00
			350,52

ANEXO V – DESEMPENHO AMBIENTAL DA ESTRUTURA A E B

CATEGORIA 1: CONSUMO DE ENERGIA

ESTRUTURA A	QUANTIDADE DE BETÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO BETÃO POR kg	QUANTIDADE DE AÇO EM VARÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO AÇO EM VARÃO POR kg	TOTAL POR m ²	CONSUMO DE ENERGIA TOTAL POR m ²
ENERGIA RENOVÁVEL INCORPORADA	1116,96	6,97E+00	25,04	3,81E+00	1,08E+01	1,45E+03
ENERGIA NÃO RENOVÁVEL INCORPORADA	1116,96	6,21E+02	25,04	8,19E+02	1,44E+03	

ESTRUTURA B	QUANTIDADE DE BETÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO BETÃO POR kg	QUANTIDADE DE AÇO EM VARÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO AÇO EM VARÃO POR kg	QUANTIDADE DE AÇO EM PERFIL POR m ² (kg)	IMPACTO DO AÇO EM PERFIL POR kg	TOTAL POR m ²	CONSUMO DE ENERGIA TOTAL POR m ²
ENERGIA RENOVÁVEL INCORPORADA	768,97	4,80E+00	12,07	1,83E+00	50,17	5,82E+00	1,25E+01	1,27E+03
ENERGIA NÃO RENOVÁVEL INCORPORADA	768,97	4,28E+02	12,07	3,95E+02	50,17	4,35E+02	1,26E+03	

COMPARAÇÃO	ENERGIA RENOVÁVEL INCORPORADA POR m ²	ENERGIA NÃO RENOVÁVEL INCORPORADA POR m ²	CONSUMO DE ENERGIA TOTAL POR m ²
ESTRUTURA A	1,08E+01	1,44E+03	1,45E+03
ESTRUTURA B	1,25E+01	1,26E+03	1,27E+03
DIFERENÇA (A-B)	-1,68E+00	1,83E+02	1,81E+02
DIFERENÇA (%)	0,1	0,1	0,1

CATEGORIA 2: EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

ESTRUTURA A	QUANTIDADE DE BETÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO BETÃO POR kg	QUANTIDADE DE AÇO EM VARÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO AÇO EM VARÃO POR m ²	TOTAL POR m ²
POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL	1116,96	1,23E+02	25,04	3,13E+01	1,54E+02
POTENCIAL DE DESTRUIÇÃO DO OZONO	1116,96	3,97E-06	25,04	1,54E-06	5,51E-06
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	1116,96	2,00E-01	25,04	1,39E-01	3,39E-01
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	1116,96	3,17E-02	25,04	3,25E-02	6,43E-02
POTENCIAL DE FORMAÇÃO DE OZONO TROPOSFÉRICO	1116,96	7,25E-03	25,04	2,08E-02	2,80E-02

ESTRUTURA B	QUANTIDADE DE BETÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO BETÃO POR kg	QUANTIDADE DE AÇO EM VARÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO AÇO EM VARÃO POR kg	QUANTIDADE DE AÇO EM PERFIL POR m ² (kg)	IMPACTO DO AÇO EM PERFIL POR kg	TOTAL POR m ²
POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL	768,97	8,46E+01	12,07	1,51E+01	50,17	2,86E+01	1,28E+02
POTENCIAL DE DESTRUIÇÃO DO OZONO	768,97	2,73E-06	12,07	7,43E-07	50,17	2,71E-06	6,18E-06
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	768,97	1,38E-01	12,07	6,72E-02	50,17	1,53E-01	3,57E-01
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	768,97	2,18E-02	12,07	1,57E-02	50,17	2,44E-02	6,19E-02
POTENCIAL DE FORMAÇÃO DE OZONO TROPOSFÉRICO	768,97	4,99E-03	12,07	1,00E-02	50,17	9,28E-03	2,43E-02

COMPARAÇÃO	POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL POR m ²	POTENCIAL DE DESTRUIÇÃO DO OZONO POR m ²	POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO POR m ²	POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO POR m ²	POTENCIAL DE FORMAÇÃO DE OZONO TROPOSFÉRICO POR m ²
ESTRUTURA A	1,54E+02	5,51E-06	3,39E-01	6,43E-02	2,80E-02
ESTRUTURA B	1,28E+02	6,18E-06	3,57E-01	6,19E-02	2,43E-02
DIFERENÇA (A-B)	2,58E+01	-6,75E-07	-1,80E-02	2,36E-03	3,73E-03
DIFERENÇA (%)	16,76%	10,92%	5,04%	3,67%	13,31%

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

CATEGORIA 3: ESGOTAMENTO DE RECURSOS

ESTRUTURA A	QUANTIDADE DE BETÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO BETÃO POR kg	QUANTIDADE DE AÇO EM VARÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO AÇO EM VARÃO POR kg	TOTAL POR m ²
Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos	1116,96	2,66E-01	25,04	3,23E-01	5,89E-01
Energia não Renovável incorporada	1116,96	6,21E+02	25,04	8,19E+02	1,44E+03

ESTRUTURA B	QUANTIDADE DE BETÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO BETÃO POR kg	QUANTIDADE DE AÇO EM VARÃO POR m ² (kg)	IMPACTO DO AÇO EM VARÃO POR kg	QUANTIDADE DE AÇO EM PERFIL POR m ² (kg)	IMPACTO DO AÇO EM PERFIL POR kg	TOTAL POR m ²
Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos	768,97	1,83E-01	12,07	1,56E-01	50,17	2,28E-01	5,66E-01
Energia não Renovável incorporada	768,97	4,28E+02	12,07	3,95E+02	50,17	4,35E+02	8,29E+02

COMPARAÇÃO	Potencial de Esgotamento de Recursos Abióticos	Energia não Renovável incorporada
ESTRUTURA A	5,89E-01	1,44E+03
ESTRUTURA B	5,66E-01	8,29E+02
DIFERENÇA (A-B)	2,23E-02	6,11E+02
DIFERENÇA (%)	3,79%	42,41%

NORMALIZAÇÃO E AGREGAÇÃO DOS PARÂMETROS

ESTRUTURA A	CATEGORIA	PARÂMETRO	ESTRUTURA DE REFERÊNCIA (1Kg)	PRÁTICA CONVENCIONAL	MELHOR PRÁTICA	ESTRUTURA A	ESTRUTURA A NORMALIZADA	PESO DO PARÂMETRO	ESTRUTURA A PONDERADA
IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO DE ENERGIA	ER + ENR	1,25E+00	1,42E+03	3,56E+02	1,45E+03	-0,02	100%	-0,02
		Estrutura A						100%	-0,02
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	GWP	1,48E-01	1,69E+02	4,23E+01	1,54E+02	0,12	20%	0,02
		ODP	3,55E-09	4,05E-06	1,01E-06	5,51E-06	-0,48	20%	-0,10
		AP	5,56E-04	6,35E-01	1,59E-01	3,39E-01	0,62	20%	0,12
		EP	5,76E-05	6,58E-02	1,64E-02	6,43E-02	0,03	20%	0,01
		POCP	5,28E-05	6,03E-02	1,51E-02	2,80E-02	0,71	20%	0,14
		Estrutura A						100%	0,20
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	ADP	6,08E-04	6,94E-01	1,74E-01	5,89E-01	0,20	50%	0,10
		ENR	1,24E+00	1,42E+03	3,54E+02	1,44E+03	-0,02	50%	-0,01
		Estrutura A						100%	0,09

ESTRUTURA B	CATEGORIA	PARÂMETRO	ESTRUTURA DE REFERÊNCIA (Kg)	PRÁTICA CONVENCIONAL	MELHOR PRÁTICA	ESTRUTURA B	ESTRUTURA B NORMALIZADA	PESO DO PARÂMETRO	PONTUAÇÃO
IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO DE ENERGIA	ER + ENR	1,25E+00	1,42E+03	3,56E+02	1,27E+03	0,15	100%	0,15
		Estrutura B						100%	0,15
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	GWP	1,48E-01	1,69E+02	4,23E+01	1,28E+02	0,32	20%	0,06
		ODP	3,55E-09	4,05E-06	1,01E-06	6,18E-06	-0,70	20%	-0,14
		AP	5,56E-04	6,35E-01	1,59E-01	3,57E-01	0,58	20%	0,12
		EP	5,76E-05	6,58E-02	1,64E-02	6,19E-02	0,08	20%	0,02
		POCP	5,28E-05	6,03E-02	1,51E-02	2,43E-02	0,80	20%	0,16
		Estrutura B						100%	0,22
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	ADP	6,08E-04	6,94E-01	1,74E-01	5,66E-01	0,25	50%	0,12
		ENR	1,24E+00	1,42E+03	3,54E+02	8,29E+02	0,55	50%	0,28
		Estrutura B						100%	0,40

Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão

NORMALIZAÇÃO E AGREGAÇÃO DAS CATEGORIAS

	CATEGORIA	ESTRUTURA A			ESTRUTURA B		
		VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO	VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO
IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO DE ENERGIA	-0,02	30%	-0,01	0,15	30%	0,05
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	0,20	30%	0,067	0,22	30%	0,072
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	0,09	30%	0,03	0,40	30%	0,13
	DESEMPENHO AMBIENTAL		100%	0,09		100%	0,25

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

	CATEGORIA	ESTRUTURA A			ESTRUTURA B		
		VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO	VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO
IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO DE ENERGIA	-0,02	0,25.	-0,01	0,15	0,25.	0,04
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	0,20	0,50.	0,100	0,22	0,50.	0,108
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	0,09	0,25.	0,02	0,40	0,25.	0,10
	DESEMPENHO AMBIENTAL		1,00.	0,12		1,00.	0,24

	CATEGORIA	ESTRUTURA A			ESTRUTURA B		
		VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO	VALORES PONDERADOS DAS CATEGORIAS	PESO DA CATEGORIA	PONTUAÇÃO
IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO DE ENERGIA	-0,02	15.	-0,004	0,15	15.	0,022
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	0,20	70.	0,141	0,22	70.	0,151
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	0,09	15.	0,014	0,40	15.	0,060
	DESEMPENHO AMBIENTAL			0,15			0,23

ANEXO VI - DESEMPENHO ECONÓMICO DA ESTRUTURA A E B

PARÂMETRO 1: CUSTOS DE CONSTRUÇÃO

CUSTOS TOTAIS ESTRUTURA A (COM BASE NA PUBLICAÇÃO DO LNEC, ACTUALIZADA EM DEZ. 2007)

ESTRUTURA A	BETÃO C20/25 (m³)	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	BETÃO C12/15 (m³)	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	AÇO A400NR (Kg)	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	PAV.TÉRREO (m²)	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	COFRAGEM (m²)	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	TOTAL
PILARES	23,76	77,34	1837,86	-	-	-	2746,00	1,31	3597,26	-	-	-	312,99	27,24	8525,85	
VIGAS	42,21	89,23	3766,82	-	-	-	3401,50	1,31	4455,97	-	-	-	348,41	31,16	10856,46	
SAPATAS	28,07	78,38	2200,13	3,81	70,01	266,95	694,30	1,31	909,53	-	-	-	88,64	18,92	1677,07	
LINTÉIS	47,22	82,57	3899,09	5,44	82,57	449,27	4121,54	1,31	5399,21	-	-	-	261,88	16,38	4289,60	
PAVIMENTO TÉRREO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	488,92	28,00	13689,76	-	-	-	
CONJUNTO	11703,90			716,22			14361,97			13689,76			25348,97			65820,82

* COM BASE NA PUBLICAÇÃO "INFORMAÇÃO SOBRE CUSTOS. FICHAS DE RENDIMENTO. A.COSTA MANSO, M.SANTOS FONSECA, J.CARVALHO ESPADA

*1 VALOR CONSIDERADO COM BASE NO ORÇAMENTO FORNECIDO, POR FALTA DE INFORMAÇÃO NA PUBLICAÇÃO REFERIDA

CUSTOS TOTAIS ESTRUTURA B (COM BASE NA PUBLICAÇÃO DO LNEC, ACTUALIZADA EM DEZ. 2007)

ESTRUTURA B	BETÃO C20/25 (m³)	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	BETÃO C12/15 (m³)	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	AÇO A400NR (Kg)	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	PAV.TÉRREO (m²)	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	COFRAGEM	CUSTO UNITÁRIO*	CUSTO TOTAL	PERFIS AÇO	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO TOTAL	TOTAL
PILARES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8076,86	5,04	40707,39	
VIGAS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12640,50	4,92	62191,26	
SAPATAS	28,07	78,38	2200,13	3,81	70,01	266,95	694,30	1,31	909,53	-	-	-	88,64	18,92	1677,07	-	-	-	
LINTÉIS	47,22	82,57	3899,09	5,44	82,57	449,27	4121,54	1,31	5399,21	-	-	-	261,88	16,38	4289,60	-	-	-	
PAVIMENTO TÉRREO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	488,92	28,00	13689,76	-	-	-	-	-	-	
CONJUNTO	6099,22			716,22			6308,74			13689,76			5966,67			102898,65			135679,27

* COM BASE NA PUBLICAÇÃO "INFORMAÇÃO SOBRE CUSTOS. FICHAS DE RENDIMENTO. A.COSTA MANSO, M.SANTOS FONSECA, J.CARVALHO ESPADA

*1 VALOR CONSIDERADO COM BASE NO ORÇAMENTO FORNECIDO, POR FALTA DE INFORMAÇÃO NA PUBLICAÇÃO REFERIDA

COMPARAÇÃO	TOTAL BETÃO	TOTAL BETÃO POR m²	TOTAL AÇO EM VARÃO	TOTAL AÇO EM VARÃO POR m²	TOTAL AÇO EM PERFIL	TOTAL AÇO EM PERFIL POR m²	TOTAL PAV.TÉRREO	TOTAL PAV.TÉRREO POR m²	TOTAL COFRAGEM	TOTAL COFRAGEM POR m²	TOTAL	TOTAL POR m²
ESTRUTURA A	12420,12	26,20	14361,97	30,30	0,00	0,00	13689,76	28,88	25348,97	53,48	65820,82	138,86
ESTRUTURA B	6815,44	14,38	6308,74	13,31	102898,65	217,09	13689,76	28,88	5966,67	12,59	135679,27	286,24
DIFERENÇA (A-B)	5604,68	11,82	8053,23	16,99	-102898,65	-217,09	0,00	0,00	19382,30	40,89	-69858,45	-147,38
DIFERENÇA (%)	45,13%		56,07%		100%		0%		76,46%		51,49%	

ANEXO VII – DESEMPENHO SUSTENTÁVEL DA ESTRUTURA A E B

DESEMPENHO SUSTENTÁVEL	ESTRUTURA A	ESTRUTURA B
AMBIENTAL	-	+
ECONÓMICO	+	-
SOCIAL	=	=
FINAL	=	=

CENÁRIO 1	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,09	50,00.	0,04	0,54
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,98	50,00.	0,49	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,25	50,00.	0,13	0,03
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	50,00.	-0,10	

CENÁRIO 2	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,09	75,00.	0,07	0,31
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,98	25,00.	0,25	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,25	75,00.	0,19	0,14
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	25,00.	-0,05	

CENÁRIO 3	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,09	90,00.	0,08	0,18
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,98	10,00.	0,10	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,25	90,00.	0,23	0,21
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	10,00.	-0,02	

CENÁRIO 4	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,12	50,00.	0,06	0,28
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,44	50,00.	0,22	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,24	50,00.	0,12	0,02
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	50,00.	-0,10	

CENÁRIO 5

CENÁRIO 5	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,12	75,00.	0,09	0,20
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,44	25,00.	0,11	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,24	75,00.	0,18	0,13
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	25,00.	-0,05	

CENÁRIO 6

CENÁRIO 6	ESTRUTURA A	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,12	85,00.	0,10	0,17
		DESEMPENHO ECONÓMICO	0,44	15,00.	0,07	
	ESTRUTURA B	DESEMPENHO AMBIENTAL	0,24	85,00.	0,21	0,18
		DESEMPENHO ECONÓMICO	-0,20	15,00.	-0,03	